

ตัวอย่าง

หน้าแรกของบทที่ไม่ต้องใส่เลขหน้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ อักษร AngsanaNew
ขนาด 20 พอยท์ ตัวหนา

เว้น 1 บรรทัด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการควบคุมความดันในถังแบบอนุกรม 2 ถัง ด้วยการควบคุมแบบ PI เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎีด้านกลศาสตร์ของไหล
- 2.2 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น
- 2.3 ทฤษฎีระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสอง
- 2.4 ทฤษฎีการควบคุมแบบ PI
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อักษรหัวข้อใหญ่ ใช้ AngsanaNew
ขนาด 18 พอยท์ ตัวหนา

2.1/ทฤษฎีพื้นฐานด้านกลศาสตร์ของไหล [1]

อากาศและน้ำ รวมทั้งของเหลวอื่นๆ รวมเรียกว่า ของไหล ซึ่งของไหลเหล่านี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆ ดังนั้นการนำของไหลไปใช้งาน จึงต้องพิจารณาถึงสภาวะในขณะนั้นด้วย ในบทนี้จะได้กล่าวถึงพื้นฐานทางทฤษฎีของของไหล เพื่อนำไปใช้ประยุกต์กับอุปกรณ์อื่นๆ

2.1.1/สมการสถานะก๊าซในอุดมคติ

อักษรหัวข้อย่อย AngsanaNew
ขนาด 16 พอยท์ ตัวหนา

$$PV = mRT \tag{2.1}$$

โดยที่ P	คือ	ความดันสัมบูรณ์ [Pa]
V	คือ	ปริมาตร [m ³]
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ [K]
m	คือ	มวล [kg]
R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ [J/kg.K]

กรณีของก๊าซชนิดเดียวกัน

$$\frac{PV}{T} = mR = \text{ค่าคงที่, หรือ } \frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \tag{2.2}$$

หัวข้อใหญ่
ขีดขอบซ้าย
เว้น 1 อักษร
ตัวหนาขนาด

อักษรภาษาอังกฤษให้วงเล็บให้
ตัวแรกพิมพ์ด้วยพิมพ์ใหญ่

ขอบกระดาษ
ด้านบน 0.5 นิ้ว
ริมขอบกระดาษ
ด้านนอก 1 นิ้ว

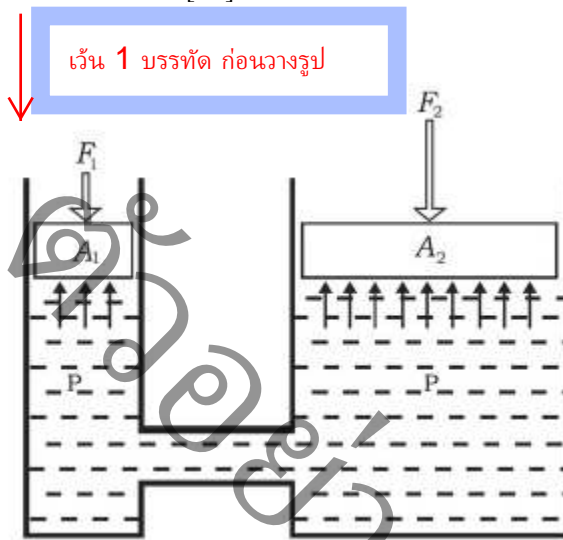
2.1.2 ของไหลสถิต (Statics of Fluid)

2.1.2.1 ความดัน

ความดันของของไหลเป็นการเปลี่ยนของแรงขนาดเดียวกันที่มีทิศทางและงานตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นๆ

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2.3)$$

โดยที่ F คือ แรงกระทำในแนวตั้งฉาก [N]
A คือ พื้นที่ [m²]



ภาพที่ 2.1 หลักเบื้องต้นของปาสคาล [1]

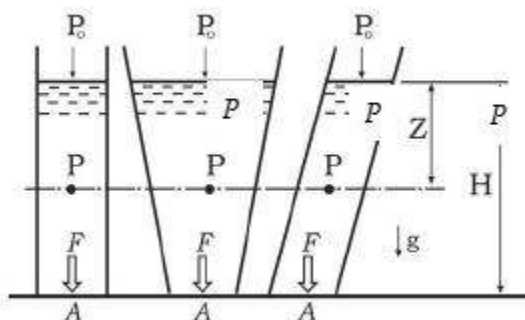
การเขียนใต้ภาพ เช่น ภาพลำดับที่ 1
ของบทที่ 2 เขียนเป็น "ภาพที่ 2.1"

2.1.2.2 ความสัมพันธ์ของความดันและความลึก

ความดันที่ตำแหน่งใดๆ จะขึ้นอยู่กับความลึกของของไหล

$$P = P_o + \rho gZ \quad (2.4)$$

สัญลักษณ์ (Symbol) ให้มี
ขนาดอักษร 12-14 พอยท์



การเขียนได้ภาพ เช่น ภาพลำดับที่ 2 ของบทที่ 2 เขียนเป็น "ภาพที่ 2.2"

ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของความดันที่ระดับต่างๆ ในของเหลว [1] ←

โดยที่ P_0 คือ ความดันบรรยากาศ [Pa]
 Z คือ ความลึก (ความสูง) [m]
 ρ คือ ความหนาแน่น [kg/m^3]
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก [m/s^2]

ดังนั้น ความแตกต่างของความดันระหว่างจุด 2 จุด ที่ความลึกแตกต่างกันสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

การเรียงหมายเลขสมการ ให้เรียงตามบทที่ ชัดขวา เช่น สมการที่ 5 บทที่ 2 จะเขียนเป็น "(2.5)"

$$P_2 - P_1 = \rho g(Z_2 - Z_1) \quad [\text{Pa}] \quad (2.5) \leftarrow$$

2.1.3 สมการสถานะของการไหล

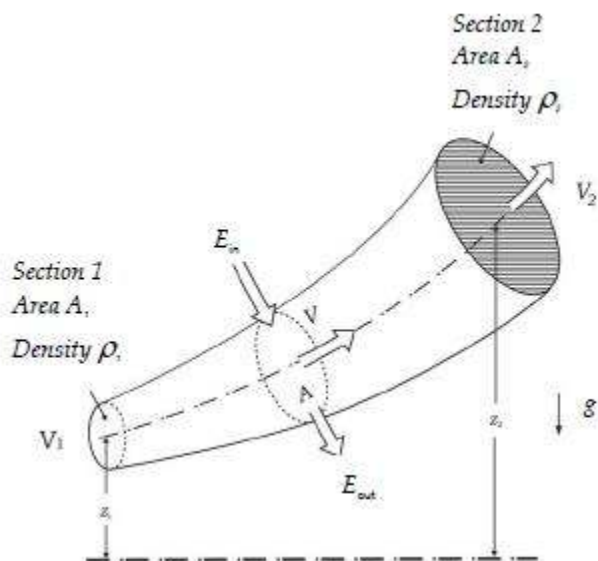
2.1.3.1 สมการกฎทรงมวล (Equation of Mass Conservation)

$$M = \rho VA = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2.6)$$

เนื่องจาก $Q = VA$

$$M = \rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 = \text{ค่าคงที่} \quad (2.7)$$

สมการ ควรเขียนไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษโดยใช้ขนาดที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.3 Steady Flow [1]

โดยที่	Q	คือ	อัตราการไหลเป็นปริมาตร [m ³ /s]
	V	คือ	ความเร็ว [m/s]
	M	คือ	อัตราไหลของมวล [kg/s]
	E _{in}	คือ	พลังงานเข้า [J/kg]
	E _{out}	คือ	พลังงานออก [J/kg]
	E _{loss}	คือ	พลังงานสูญเสียเนื่องจากความดันลดลง [J/kg]

หัวข้อย่อยไม่ควรเกิน 4 ตำแหน่ง

→ 2.1.3.2 สมการสมดุลพลังงาน (Equation of Energy Conservation)

หัวข้อถัดไปตัวเลข ตรงกับอักษรตัวแรก → พลังงานของของไหลที่จุดใดๆ จะเท่ากันกำหนดโดยผลรวมของพลังงานทั้ง 3 นที่สะสมอยู่ในของไหล พลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ดังนี้

$$h + \frac{v^2}{2} + gZ \quad (2.8)$$

โดยที่	h	คือ	เอนทาลปี [J/kg]
	$\frac{v^2}{2}$	คือ	พลังงานจลน์ [J/kg]
	gZ	คือ	พลังงานศักย์ [J/kg]

เมื่อพิจารณาพลังงานเข้าและออก E_{in} และ E_{out} สมการต่อไปนี้จะแสดงถึงความสอดคล้องของสมการสมดุลพลังงาน

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1\right) + (E_{in} - E_{out}) = h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \quad (2.9)$$

เมื่อ g เป็นความเร่ง ซึ่งค่าความเร่งมาตรฐาน g_n เป็น $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$

อย่างไรก็ดีของไหลจะมีความหนืดซึ่งเกิดความเสียดทานระหว่างของไหลและผนังด้านในของท่อทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพื่อเอาชนะกับความเสียดทาน ซึ่งเรียกว่าเป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความดันเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก ดังนี้

$$\Delta h = h_2 - h_1 = E_{loss} + \frac{\Delta P}{\rho} = E_{loss} + (P_2 - P_1)/\rho \quad (2.10)$$

จากสมการข้างต้นจะได้ผลดังนี้

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1\right) + (E_{in} - E_{out} - E_{loss}) = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \quad (2.11)$$

ในกรณีที่ไม่มี การสูญเสีย สมการจะเป็นดังนี้

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} + \rho gZ_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho gZ_2 \quad (2.12)$$

สมการข้างบนนี้เรียกว่า “สมการเบอร์นูลลี”

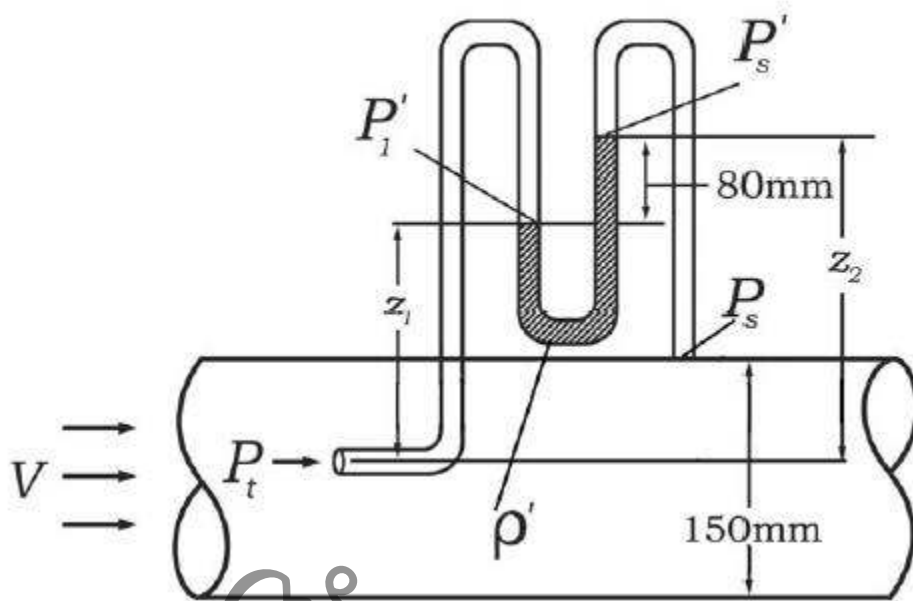
$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gZ = \text{ค่าคงที่} \quad (2.13)$$

กรณีของไหลเป็นก๊าซค่าของความหนาแน่น ρ จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ρgZ ในสมการข้างบนจึงไม่นำมาพิจารณา

หัวข้อย่อยเว้นจาก
ขอบซ้าย 1.5 ซม.
ใช้ตัวเลขหัวข้อย่อย
ตามด้วยเครื่องหมาย
มหัพภาค (.)
ตัวหนา
ขนาด 16 พอยท์

2.1.3.3 หลักเบื้องต้นการวัดอัตราไหล

การวัดความดันรวม ความดันสถิต โดยใช้มาโนมิเตอร์ เพื่อคำนวณอัตราการไหล



ภาพที่ 2.4 มาโนมิเตอร์ [1]

โดยที่	P_t	คือ	ความดันรวม [Pa]
	P_s	คือ	ความดันสถิต [Pa]
	P_d	คือ	ความดันไดนามิก [Pa]
	ρ'	คือ	ความหนาแน่นของไหลในมาโนมิเตอร์ [kg/m^3]
	V	คือ	ความเร็ว [m/s]

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวม ความดันสถิต และความดันไดนามิก จะเป็นดังนี้

$$P_t = P_s + P_d = P_s + \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{เมื่อ} \quad P_d = \frac{\rho V^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (2.14)$$

$$V = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.15)$$

$$Q = AV = \pi \frac{D^2}{4} V \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.16)$$

2.1.3.4 การวัดความเร็วของของไหลโดยใช้พิทอตทิวบ์ (Pitot Tube)

ความเร็วของของไหลที่วัดด้วยพิทอตทิวบ์ จะถูกคำนวณจากความดันไดนามิกส์ (ซึ่งเป็นความแตกต่างของความดันรวมและความดันสถิต) ดังสมการข้างล่างนี้

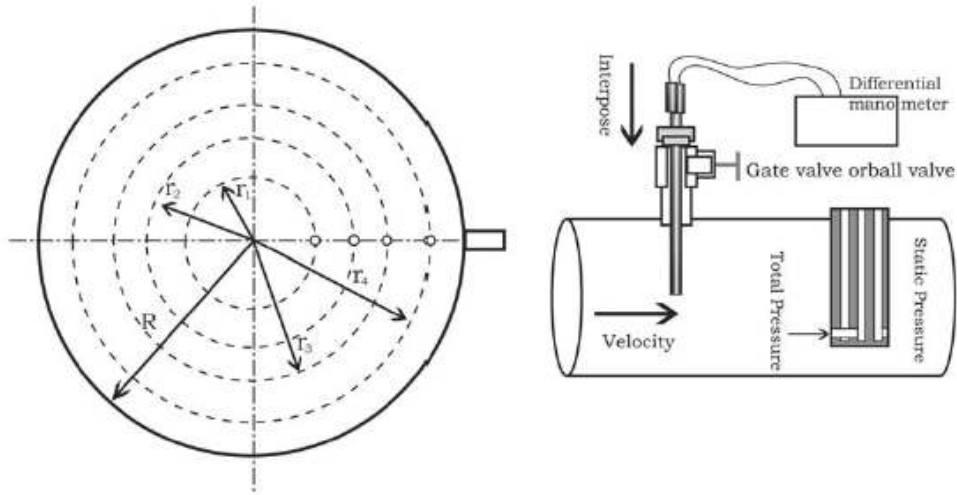
$$V = C \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad \text{หรือ} \quad V = C \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad (2.17)$$

โดยที่ $P_d = P_t - P_s$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่ของท่อ [m ²]
	V	คือ	ความเร็ว [m/s]
	C	คือ	สัมประสิทธิ์ของพิทอตทิวบ์ [-]
	P _d	คือ	ความดันไดนามิก [Pa]
	P _t	คือ	ความดันรวม [Pa]
	P _s	คือ	ความดันสถิต [Pa]
	ρ	คือ	ความหนาแน่นที่สภาวะกำหนด

หมายเหตุ: Pitot Tube ประดิษฐ์ขึ้นโดย Henri Pitot เป็นนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ในปี ค.ศ.1732
 ดังนั้นบางครั้งจึงอ่านว่า พิโต ตามภาษาฝรั่งเศส

จุดที่วัดของพิทอตทิวบ์



Applied diameter 2R(m)	Distance from center $r_n(m)$			
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
$2R \leq 1$	0.707 R			
$1 < 2R \leq 2$	0.500 R	0.866 R		
$2 < 2R \leq 4$	0.408 R	0.707 R	0.913 R	
$4 < 2R \leq 4.5$	0.354 R	0.612 R	0.791 R	0.935 R

$n =$ ครั้งที่

ภาพที่ 2.5 แสดงตำแหน่งและระยะวัดของพิทอตทิวบ์ [1]

หัวข้อย่อยเว้นจากขอบซ้าย 1.5 ซม. ใช้ตัวเลขหัวข้อใหญ่ตามด้วยเครื่องหมายมหัพภาค (.) เว้น 1 อักษรตัวหนา ขนาด 16 พอยท์

2.1.4 ของไหลในท่อ

2.1.4.1 ความดันสูญเสียในท่อตรง

ความดันสูญเสียเนื่องจากความฝืด ΔP [Pa] ได้แสดงในสมการข้างล่างนี้

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \tag{2.18}$$

- เมื่อ L คือ ความยาวของท่อ [m]
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [m]
- V คือ ความเร็วเฉลี่ย [m/s]
- Q คือ อัตราไหลเป็นปริมาตร [m³/s]

f คือ สปส. ความเสียดทาน (ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำท่อ) [-]

เมื่อแทนค่า $V = Q / \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)$ ในสมการข้างบนจะได้สมการเป็น

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{8f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (2.19)$$

2.1.4.2 ความดันสูญเสียในท่อแบบอื่นๆ

ความดันที่สูญเสียเนื่องจากการไหลวนของของไหลจะเป็นเช่นเดียวกับความเสียดทาน ซึ่งแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\frac{\Delta P}{\rho} = K \frac{V^2}{2} \quad (2.20)$$

ความดันสูญเสีย ΔP ผ่านท่อ คำนวณโดยการรวมสมการข้างต้นจะได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \left(f \cdot \frac{L}{D} + K\right) \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.21)$$

K มีค่าโดยประมาณดังนี้

ทางเข้าท่อ $K \approx 0.5$

ทางออกท่อ $K \approx 1.0$

เมื่อ K สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของส่วนประกอบท่อ เช่น ข้อต่อ วาล์ว จะมีความยาวเทียบเท่าท่อตรงเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของท่อเทียบเท่าท่อตรง [1]

หน่วย(ม.)

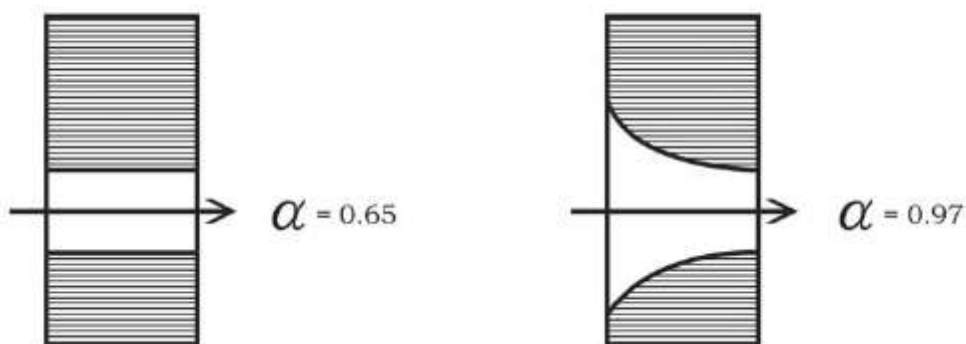
Diameter(inch) Piping parts	15A	20A	25A	40A	50A	80A	100A	150A	200A	250A
	½B	¾B	1B	1½B	2B	3B	4B	6B	8B	10B
Glove valve	2.57	3.71	4.94	8.99	11.92	21.58	28.55	47.37	67.69	89.17
Gate valve	0.06	0.09	0.11	0.21	0.28	0.50	0.66	1.09	1.56	2.06
Butterfly valve	0.08	0.11	0.15	0.28	0.37	0.66	0.88	1.46	2.08	2.74
Angle valve	1.38	2.00	2.66	4.84	6.42	11.62	15.37	25.50	36.45	48.02
Y-shaped valve	1.07	1.54	2.05	3.73	4.95	8.96	11.86	19.68	28.12	37.04
Y-shaped strainer	2.57	3.71	4.91	8.99	11.92	21.58	28.55	47.37	67.69	89.17
Stop valve(lift-type)	2.57	3.71	4.94	8.99	11.92	21.58	28.55	47.37	67.69	89.17
Stop valve(swing-type)	0.99	1.43	1.90	3.46	4.59	8.30	10.98	18.22	26.03	34.30
Expandable Joint	0.26	0.37	0.49	0.90	1.19	2.16	2.85	4.74	6.77	8.92
Flexible Joint	0.59	0.86	1.14	2.07	2.75	4.98	6.59	10.93	15.62	20.58
Elbow 90° (screw)	0.51	0.74	0.99	1.80	2.38	4.32	5.71	9.47	13.54	17.83
Elbow 90° (welded)	0.30	0.43	0.57	1.04	1.38	2.49	3.29	5.47	7.81	10.29
T-shaped Tube (straight)	0.18	0.26	0.34	0.62	0.83	1.49	1.98	3.28	4.69	6.18
T-shaped Tube (bent line)	0.65	0.94	1.25	2.28	3.03	5.48	7.25	12.02	17.18	22.64
Reducer (reduced by 1 size)	0.06	0.09	0.12	0.22	0.29	0.53	0.70	1.17	1.67	2.20
Reducer (reduced 2 size)	0.12	0.17	0.23	0.41	0.55	1.00	1.32	2.19	3.12	4.12

2.1.4.3 การคำนวณการรั่วไหล

ปริมาณการรั่วไหลจะคำนวณโดยสมการซึ่งได้จากการทดลอง ดังนี้

$$Q = 113.3 \times \frac{\pi}{4} D^2 \times \alpha \times \frac{(P+101.3)}{10^{\sigma}} \quad (2.22)$$

เมื่อ	Q	คือ	ปริมาณการรั่ว [m ³ /min]
	P	คือ	ความดันเกจภายในถัง [kPa : G]
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูรั่ว [mm]
	α	คือ	Shape factor ของรูประมาณ 0.65 – 0.97



ภาพที่ 2.6 แสดงค่า Shape Fraction ของรูที่ลักษณะต่างกัน [1]

2.2 กลศาสตร์ของไหลเบื้องต้น (Fundamental of fluid mechanics) [2]

2.2.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

ของไหล (Fluid) คือ ของเหลว และก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้าง แต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

ของไหลอัดตัวได้ คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ก๊าซอยู่ในภาชนะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซที่จะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นก็จะลดลง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ มวล (m) ของสารนั้นหารด้วยปริมาตร (V)

ปริมาตรเฉพาะ (Specific volume, v) คือ ปริมาตรของสารนั้นหารด้วยมวล ซึ่งจะมีค่าเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น

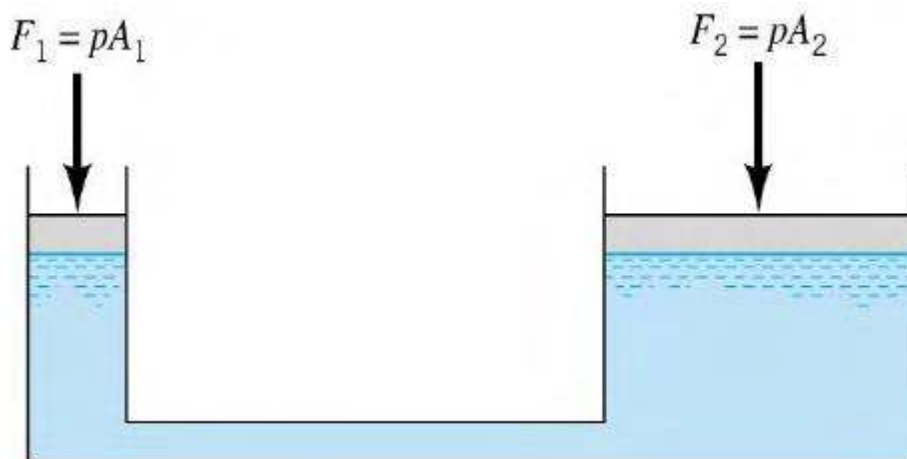
ความหนืด (Viscosity, μ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล

น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, γ) คือ ความหนาแน่น คูณกับค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) หรือน้ำหนัก (mg) หารด้วยปริมาตร

2.2.2 แรงสถิตของของไหล

ความดันของของไหล ณ จุดๆ หนึ่งจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ ทิศทาง และจะกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่นั้นๆ ซึ่งก็เป็นทฤษฎีของปาสคาล ในภาพที่ 2.7 เมื่อใช้ทฤษฎีนี้ และให้ความดันของของเหลวเป็น p [Pa] จะได้ว่า

$$p = F[N]/A[m^2] = F_1 / A_1 = F_2 / A_2 \quad (2.23)$$



ภาพที่ 2.7 ทฤษฎีของปาสคาล [2]

2.2.2.1 ความดันกับระดับความลึกของของไหล

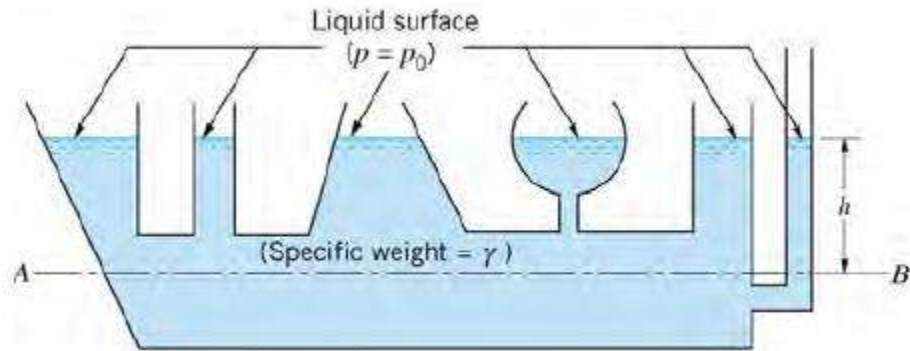
ค่าความดันในของไหล (ของเหลว) จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดหรือความใหญ่ของภาชนะที่บรรจุ โดยค่าความแตกต่างของความดันของจุด 2 จุด ที่มีความลึกที่แตกต่างกันในของไหลสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_2 - P_1 = \rho g(Z_2 - Z_1) = \gamma(Z_2 - Z_1) \quad (2.24)$$

โดยที่

$P_2 - P_1$	คือ	ค่าความแตกต่างของความดัน ระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2
ρ	คือ	ค่าความหนาแน่นของไหล (ของเหลว) [kg/m^3]
g	คือ	ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2]
$Z_2 - Z_1$	คือ	ค่าความแตกต่างกันของความลึกในของเหลว [m]

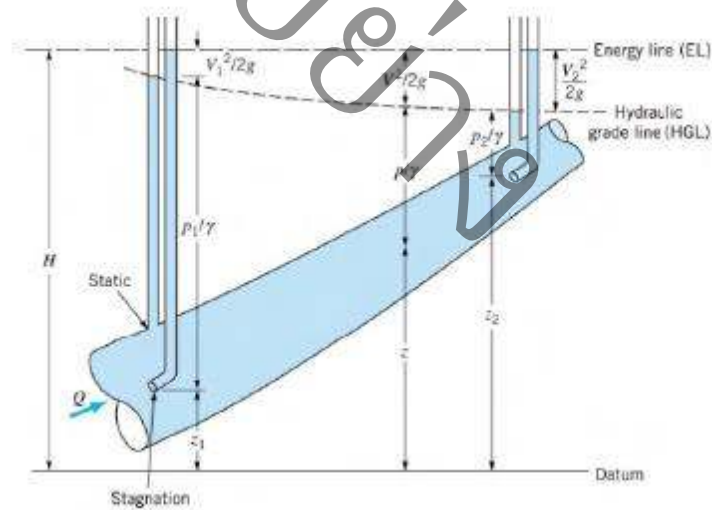
จากภาพที่ 2.8 ความดันของจุดทุกจุดบนเส้น A-B ซึ่งมีความลึกเท่ากัน คือ h จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งหาค่าได้จากสมการ 2.24 จะสังเกตได้ว่ามิได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของภาชนะ



ภาพที่ 2.8 ความดันกับความลึกของของไหล [2]

2.2.3 สมการพื้นฐานของการไหล

ในภาพที่ 2.9 แสดงการไหลของของไหล เมื่อกำหนดพื้นที่ตัดขวาง (Cross Section Area) ให้เป็น A [m²] ความเร็วเฉลี่ยในการไหลผ่านพื้นที่ตัดขวางเป็น V [m/s] และคิดให้เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady Flow) ตัวเลข 1 และ 2 ที่เป็นตัวห้อยจะหมายถึงพื้นที่ตัดขวางที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2



ภาพที่ 2.9 การไหลในสภาวะปกติ [2]

จากภาพค่าตัวแปรต่างๆ จะแสดงในหัวข้อ 2.2.3.2

2.2.3.1 สมการของการอนุรักษ์มวล

มวลสารที่เกิดการไหลในระบบหนึ่งจะเท่ากันตลอดทุกๆ หน้าตัด เมื่อให้ปริมาณการไหลของมวลสารเป็น \dot{M} [kg/s] จะเขียนสมการได้ว่า

$$\begin{aligned}\dot{M} &= \rho VA = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 = \text{ค่าคงที่} \\ &= \rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 = \text{ค่าคงที่}\end{aligned}\quad (2.25)$$

โดยที่

ρ	คือ	ค่าความหนาแน่นของไหล (ของเหลว) [kg/m ³]
Q	คือ	เป็นอัตราการไหลของปริมาตร (Volume flow rate) หรือเรียกสั้นๆ ว่าอัตราการไหล (Flow rate) ของของไหล [m ³ /s]

ถ้าให้ค่า Q เท่ากับ \dot{M} / ρ แล้ว และ ρ เป็นค่าคงที่ (เป็นของเหลวที่อัดตัวไม่ได้) ในกรณีนี้จะทำให้ Q ก็เป็นค่าคงที่เช่นเดียวกัน

2.2.3.2 สมการของการอนุรักษ์พลังงาน

พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลต่อหน่วยมวลคือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะ [J/kg] พลังงานจลน์ $V^2/2$ [J/kg] และพลังงานศักย์ gz [J/kg] ในระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่ 1 และ 2 เมื่อมีพลังงานจากภายนอกเข้ามาโดยจะให้พลังงานนี้เป็น E_{in} [J/kg] (ยกตัวอย่างเช่นพลังงานจากปั๊ม, Blower, หรือการเพิ่มความร้อน) และถ้าให้พลังงานจากของไหลที่ออกไปสู่สิ่งแวดล้อมเป็น E_{out} (เช่นงานจากกังหัน, การทำความเย็น) จากกฎของการอนุรักษ์พลังงานกรณีการไหลคงตัวจะเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$(h_1 + V_1^2 / 2 + gz_1) + (E_{in} - E_{out}) = (h_2 + V_2^2 / 2 + gz_2) \quad (2.26)$$

โดยค่า g เป็นค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก $g_n = 9.80665$ [m/s²]

สมการนี้จะเป็นสมการทั่วไปของการไหล สำหรับการไหลที่คิดค่าความหนืดเป็นการไหลในบริเวณที่ใกล้กับผนังแข็ง เช่นผิวท่อ งานที่เกิดจากความเสียดทานในการไหลอันเนื่องมาจากความหนืด ฯลฯ จำเป็นที่จะต้องคิดพลังงานในส่วนนี้แยกออกมาอีก ซึ่งงานจำนวนนี้จะกลายเป็นความร้อน และกลายเป็นพลังงานไม่มีประสิทธิภาพ (ไม่สามารถนำมาใช้งานได้) การ

สูญเสียพลังงานที่มีประสิทธิภาพจำนวนนี้จะสูญเสียในรูปแบบของความดัน โดยพลังงานที่สูญเสียไปนี้เป็น E_{loss} ในวิชาอุณหภูมิจลศาสตร์นั้น การเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปี Δh กับการเปลี่ยนแปลงความดัน Δp สามารถเขียนเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์กันได้ดังนี้ ($\Delta h = \Delta q + v\Delta p = \Delta q + \Delta p/\rho$) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า $\Delta h = E_{loss} + \Delta p/\rho$ จากสมการที่ 2.26 เมื่อใช้ค่า $h_1 - h_2 = E_{loss} + (p_2 - p_1)/\rho$ แทนลงไปและไม่คิดถึงเรื่องการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลจะเขียนสมการได้เป็น

$$(p_1 / \rho + V_1^2 / 2 + gz_1) + (E_{in} - E_{out} - E_{loss}) = (p_2 / \rho + V_2^2 / 2 + gz_2) \quad (2.27)$$

สมการนี้เป็นสมการของการอนุรักษ์พลังงานในกรณีของไหลไม่สามารถอัดตัวได้ สมการนี้ไม่เพียงแต่จะใช้กับของเหลวเท่านั้น ในกรณีของแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมिन้อยมากจนถือได้ว่า ρ มีค่าคงที่ สมการนี้ก็สามารถนำไปใช้ได้อีกด้วย สมการนี้ไม่มีพลังงานเข้า หรือออกจากภายนอก และไม่มี E_{loss} จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$p + \rho v^2 + \rho gz = \text{ค่าคงที่} \quad (2.28)$$

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ข้างบนนี้ใช้ในกรณีที่การไหลไม่มีการสูญเสียพลังงาน ไม่มีงานเข้า-ออกจากระบบ และไม่สามารถอัดตัวได้ในกรณีการไหลเทอม p , $\rho V^2/2$, ρgz ในสมการนี้จะหมายถึง แรงดันสถิตย (Static Pressure) ความดันขับ และความดันรวม อนึ่งค่า ρ ของแก๊สจะมีค่าน้อยมาก และถ้าค่า z ของจุดที่พิจารณา 2 จุดมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ทำให้เทอม ρgz ในสมการที่ 2.27 และสมการที่ 2.28 สามารถตัดทิ้งไปได้

2.2.3.3 กำลังของของไหลใน (เส้น) การไหล (Streamline)

จากความรู้วิชากลศาสตร์ ของไหลที่มีมวล m เมื่อมีแรง F ที่รวมกันเป็นเวกเตอร์ ΣF มากระทำในระยะเวลา Δt และมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ΔV จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$(\Sigma F) \Delta t = m (\Delta V) \quad (2.29)$$

ซึ่งทิศทางของการไหลเป็นดังแสดงในภาพที่ 2.9 ในระหว่างพื้นที่หน้าตัดที่ 1 และ 2 ในขณะที่ของไหลมีมวลการไหล $\dot{M} [\text{kg/s}] = m/\Delta t$ ไหลอยู่ ของไหลจะได้รับแรงกระทำในทิศทาง x ซึ่งแรงที่กระทำในทิศทางนี้จะเป็น ΣF_x ซึ่งเท่ากับโมเมนตัมที่เปลี่ยนแปลงไป

$$(\Sigma F_x) \cdot \Delta t = m \cdot (V_{2x} - V_{1x}) = \dot{M} \cdot \Delta t \cdot (V_{2x} - V_{1x}) \quad (2.30)$$

จะได้ว่า

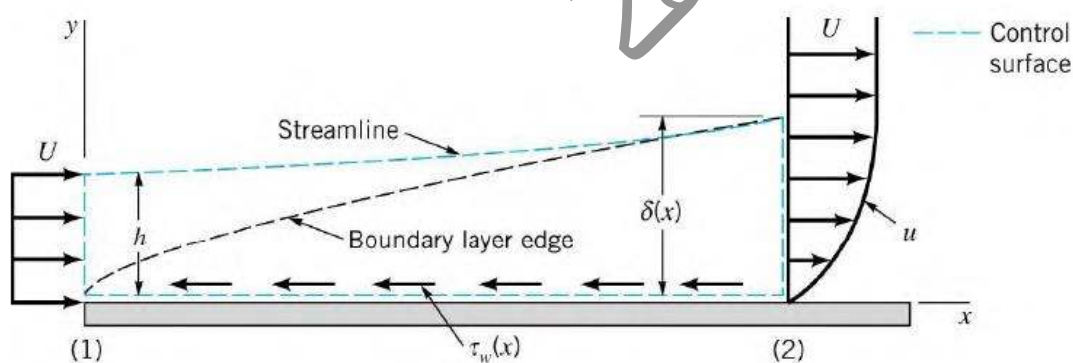
$$(\Sigma F_x) = \dot{M} \cdot (V_{2x} - V_{1x}) = \rho \cdot Q \cdot (V_{2x} - V_{1x}) [N] \quad (2.31)$$

สำหรับในทิศทางของแกน y และ แกน z ก็จะคิดเหมือนกัน

2.2.4 การไหลของของไหลที่คิดความหนืด

2.2.4.1 การไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลเป็นชั้นๆ (Laminar Flow) กับ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 2.10 เมื่อของไหลซึ่งมีความหนืดไหลไปตามผิวของวัตถุ ความหนืดของของไหลจะทำให้อนุภาคเล็กๆ ของของไหลยึดติดอยู่กับผิวของวัตถุ โดยมีความเร็ว $U = 0$ เป็นเหตุให้ของไหลเมื่อยิ่งเข้าไปใกล้ผิววัตถุมากยิ่งขึ้นจะทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลมากยิ่งขึ้น ในชั้นนี้เรียกว่า “ชั้นขอบเขตของความเร็ว (Velocity Boundary)” ส่วนการไหลที่อยู่นอกขอบเขตนี้ไปเรียกว่า “เส้นการไหลหลัก (Mainstream)” ซึ่งสามารถจะตัดทิ้งผลกระทบจากความหนืดได้



ภาพที่ 2.10 ชั้นขอบเขตของความเร็วที่ถูกสร้างขึ้นมาเมื่อมีการไหลที่ผิวของวัตถุ [2]

ชั้นขอบเขตของการไหลนี้จะแบ่งออกเป็นชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (ไหลเป็นชั้น) (Laminar Flow) กับ ชั้นขอบเขตของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การไหลภายในชั้นขอบเขตการไหลเป็นชั้นนั้น จะมีเส้นของการไหลอย่างเป็นระเบียบเกิดขึ้น และ

เนื่องมาจากความหนืดที่มีอยู่ในโมเลกุลเล็กของของไหลจะทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear) τ [Pa] ขึ้นในการไหลโดย

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dy} \quad (2.32)$$

ในสมการนี้ค่า μ (Viscosity) [Pa*s] เป็นค่าความหนืดของของไหล เป็นค่าที่แสดงถึงการส่งถ่ายปริมาณโมเมนตัมในการไหลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวยของโมเลกุลของการไหล

ขณะเดียวกันการไหลภายในชั้นของขอบเขตการไหลแบบปั่นป่วนนั้น จะไม่มีสมการตายตัว การไหลจะเป็นลักษณะที่ไม่มีระเบียบ (Disorder) แรงเฉือนที่เกิดในของไหลจะหาได้จาก

$$\tau = \rho \cdot (\nu + \epsilon_m) \cdot \frac{dU}{dy} \quad (2.33)$$

โดยค่า ν คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) μ/ρ ส่วนค่า ϵ_m [m²/s] เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงจลนศาสตร์ (หรืออาจจะเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายปริมาณโมเมนตัมอลวน ระดับความหนืดเชิงจลนศาสตร์) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการขนถ่ายโมเมนตัมอันเนื่องมาจากการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของการไหล และชนิดของของไหล ในการแยกการไหลว่าเป็นการไหลแบบชั้น (ไหลแบบราบเรียบ) หรือเป็นการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแยกได้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ที่ไม่มีมิติที่เรียกว่า “ค่าเรย์โน Re (Reynolds Number)” เป็นตัวกำหนดในการแยกการไหล โดย

$$\begin{aligned} Re &= (\text{ความเร็วในการไหล}) \times (\text{ความยาว}) / \text{ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลนศาสตร์} \\ &= \text{แรงขับเคลื่อนของการไหล} / \text{ความหนืดในการไหล} \end{aligned}$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.34)$$

ค่าเรย์โนที่อยู่ในระหว่างเปลี่ยนจากการไหลแบบเป็นชั้นไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนนั้นเรียกว่า “ค่าเรย์โนวิกฤติ (Critical Reynolds)” และสำหรับของไหลที่ประพฤติตามสมการที่ 2.32 จะเรียกว่า “ของไหลนิวโทเนียน (Newtonian fluid)” ส่วนของไหลที่ไม่ประพฤติตาม

จะเรียกว่า “ของไหลที่ไม่ใช่ของไหลนิวโทเนียน (Non-Newtonian Fluid)” (ยกตัวอย่างเช่น ยาง) เนื่องจากค่าเรย์โนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงขับเคลื่อนของการไหลต่อความหนืด ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าค่าเรย์โนมีค่ามากก็สามารถแสดงเป็นเชิงสัมพันธ์ให้เห็นว่าผลกระทบ (Effect) ของค่าความหนืดจะมีค่าน้อย

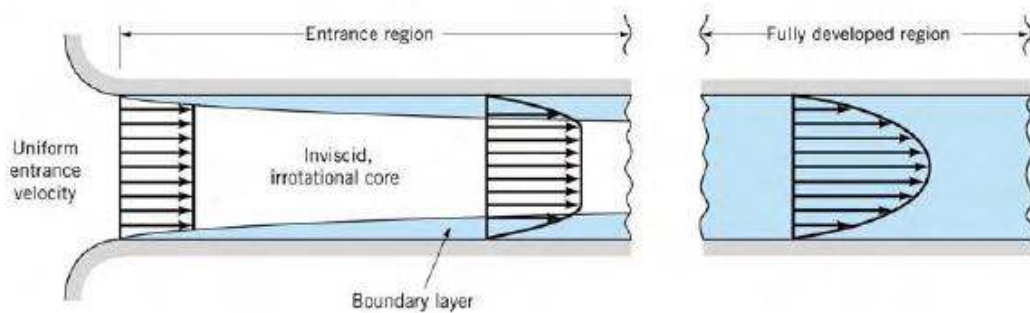
2.2.4.2 การไหลในท่อกลม

การไหลในท่อกลมที่บริเวณทางเข้าท่อที่แสดงในภาพที่ 2.11 นั้นจะเห็นว่าตั้งแต่ที่บริเวณทางเข้า ชั้นขอบเขตของความเร็วจะค่อยๆ พัฒนาเพิ่มขึ้นทีละเล็กทีละน้อย จนถึงระยะทางค่าหนึ่ง (L_e) ชั้นของความเร็วจะซ้อนกันทั้งบน และล่าง หลังจากนั้นการกระจายความเร็วจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการไหลได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์ (Fully Developed) ค่าเรย์โน Re สำหรับการไหลภายในท่อนั้นถ้าให้ v เป็นค่าความเร็วเฉลี่ย D เป็นศูนย์กลางภายในของพื้นที่ตัดขวางท่อแล้วจะได้

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{\rho vD}{\mu} = \frac{[M/(\pi D^2/4)]D}{\mu} \quad (2.35)$$

อนึ่งค่า $\rho\nu$ [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] จะเป็นค่าการไหลของมวลสารต่อพื้นที่หน้าตัดในการไหล สำหรับในกรณีของแก๊สนั้น การเพิ่มความร้อนภายในท่อจะทำให้แก๊สขยายตัวมีความเร็ว v เพิ่มขึ้น ค่า $\rho\nu$ จะไม่เปลี่ยนแปลงถ้าพื้นที่หน้าตัดมีค่าคงที่ ซึ่งเงื่อนไขที่สะดวกในการคำนวณ นอกจากนั้นโดยปกติจะถือว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด μ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความดันอีกด้วย ส่วนค่าความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ν ซึ่งเท่ากับ μ/ρ ในกรณีของแก๊สจะเป็นค่าที่ผกผันกับความดันซึ่งจะต้องระมัดระวัง

ค่าเรย์โนวิกฤติ Re_c ของการไหลภายในท่อที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว คือค่าเรย์โน ที่การไหลเปลี่ยนจากการไหลราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่า $Re_c = 2300$ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 2000-4000 โดยประมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนในการไหล ความขรุขระภายในท่อที่ไหล หรือรูปทรง และสภาพของทางเข้า ส่วนค่าเรย์โนที่ต่ำกว่า 2000 ไม่ว่าท่อจะมีความยาวมากเพียงใด การไหลก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะยังคงรักษาสภาพการไหลแบบชั้น หรือราบเรียบต่อไป



ภาพที่ 2.11 การไหลภายในท่อกลม [2]

การไหลแบบเป็นชั้น/การไหลแบบราบเรียบภายในท่อกลม

ภาพที่ 2.11 เป็นภาพที่แสดงให้เห็นว่า การกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาอย่างสมบูรณ์แล้วจะเป็นรูปพาราโบลา ถ้าให้ V เป็นความเร็วเฉลี่ยในการไหล และให้ U_c เป็นความเร็วที่จุดศูนย์กลางของท่อ เราสามารถแสดงความสัมพันธ์กันได้ดังนี้

$$V = \frac{\dot{M}}{\rho(\pi D^2/4)} = \frac{U_c}{2} \quad (2.36)$$

ในท่อที่มีความยาวเป็น L จะมีการสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากการสูญเสียความดันคือ $\Delta p/\rho$ [J/kg] ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.37)$$

ในที่นี้ $\Delta p/\rho$ จะเรียกว่า “ความดันที่สูญเสียไป”

การไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อกลม ($Re > 4000$)

ภาพที่ 2.11 แสดงให้เห็นการกระจายความเร็วที่ได้พัฒนาได้อย่างสมบูรณ์การกระจายความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความเร็วเฉลี่ยหาได้จาก

$$V = 0.82 U_c \quad (2.38)$$

อนึ่งสำหรับการไหลภายในท่อที่ไม่ใช่ท่อกลมนั้นจะใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล) De ซึ่งหาได้จาก

$$De = \frac{4A}{L_p} \quad (2.39)$$

โดย A จะเป็นพื้นที่หน้าตัดในการไหล L_p จะเป็นความยาวเส้นรอบรูปของพื้นที่หน้าตัดของของไหลที่สัมผัสผนังของท่อ ในกรณีของท่อกลม $De = D$

2.2.5 การขนส่งของไหล

2.2.5.1 ความดันที่สูญเสียไปในท่อตรง

การไหลในท่อตรงนั้น การสูญเสียทั้งหมดจะเกิดขึ้นมาจากแรงเสียดทานระหว่างชั้นของของไหลที่อยู่ติดกับผนังของท่อ หรือความหนืดโดยความดันที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทาน Δp สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.40)$$

โดยในที่นี้ค่า f จะเรียกว่า “ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (Friction Factor)” และค่า L เป็นค่าความยาว, ค่า D เป็นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, ส่วนค่า V เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของการไหล จากความสัมพันธ์ของค่า V และ Q ในสมการที่ 2.24 ซึ่ง $V = Q/(\pi D^2/4)$ เมื่อแทนค่านี้ลงไป ในสมการข้างบนจะได้ว่า

$$\frac{\Delta p}{\rho} = 8fL \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (2.41)$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ชัดว่า ค่าความดันที่สูญเสียไป Δp ของท่อที่ยาว L และมีอัตราการไหล Q จะเป็นปฏิภาคที่ผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อยกกำลัง 5

กรณีการไหลแบบราบเรียบ

จากสมการที่ 2.37

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.42)$$

ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน

โดยทั่วไปจะเป็นสมการที่ได้จากการทดลอง

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (2.43)$$

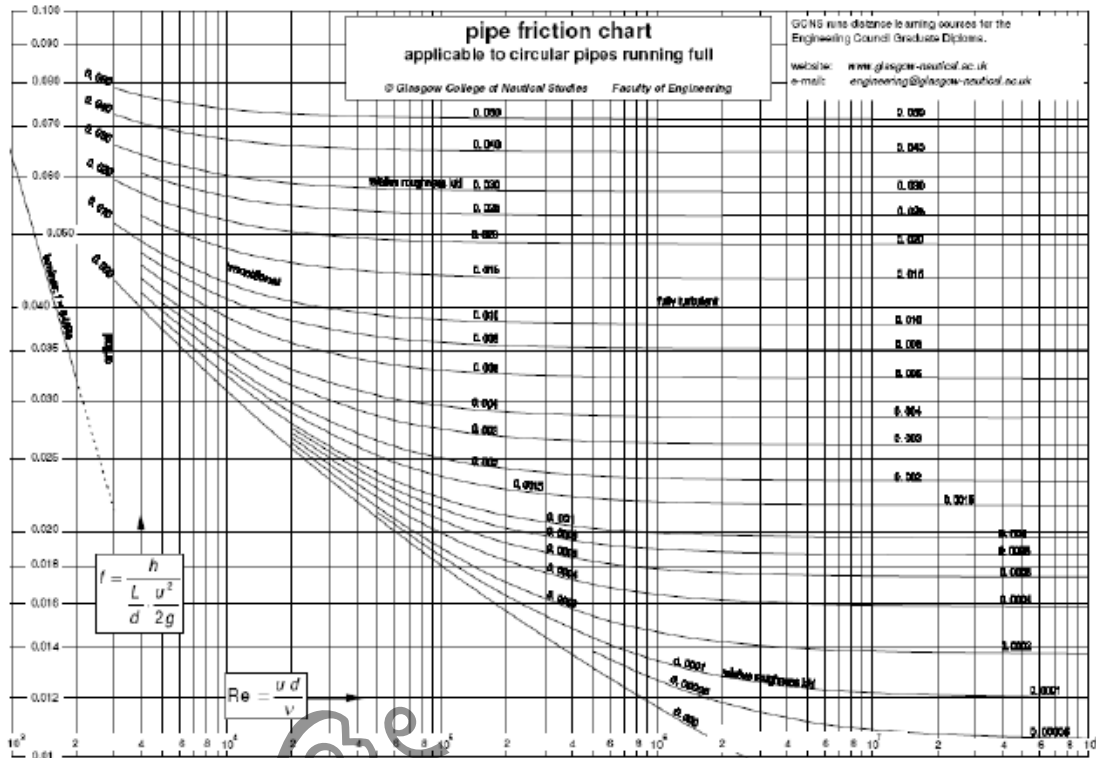
จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่าค่า f ในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะเป็นฟังก์ชันที่ไม่ได้ขึ้นกับค่า Re มากนัก ในทางปฏิบัติจริงๆ สามารถใช้เป็นค่าคงที่ได้ แต่ในกรณีของการไหลแบบราบเรียบนั้นค่า f จะแปรผกผันกับค่า Re (หรือกล่าวได้ว่าแปรผกผันกับค่า V, D) ในสมการที่ 2.43 ค่า f เป็นค่าของท่อผิวเรียบ สำหรับค่า f ของท่อที่มีผิวขรุขระและค่า Re มีค่ามากๆ ค่า f สามารถหาได้จากแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า f และค่า Re ซึ่งมีชื่อว่าแผนภาพ มูดี้ (Moody Diagram)

2.2.5.2 องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดันในการไหลภายในท่อ

เมื่อเกิดการไหลภายในท่อ จะเห็นว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ที่จะต้องมีการสูญเสียพลังงานจำนวนหนึ่งสูญเสียไป โดยความดันลดลง ความดันที่สูญเสีย Δp ไปได้ สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = 0.5KV^2 \quad (2.44)$$

โดยในที่นี้ ค่า K จะเป็นค่า “สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดัน”



ภาพที่ 2.12 แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า f และค่า Re [2]

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียความดันที่บริเวณทางเข้าท่อจะขึ้นอยู่กับรูปทรงและสภาพของท่อทางเข้าโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ส่วนที่ทางออกของท่อจะมีค่าประมาณ 1.0 ส่วนท่อ 90 องศา จะมีค่าประมาณ 0.5 – 0.75 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการสูญเสียความดัน Δp เกิดขึ้นในท่อ มักจะเขียนในรูปการสูญเสีย พลังงานที่ไม่เกิดประโยชน์ต่อหน่วยของเวลานั้นคือ $\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t}$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

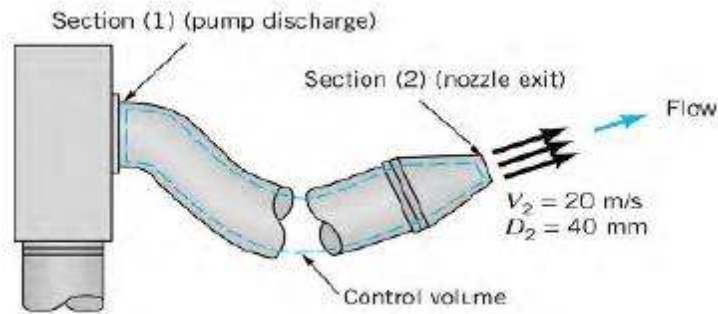
$$\frac{\Delta E_{loss}}{\Delta t} = \frac{\Delta p \cdot M}{\rho} = \Delta p \cdot Q \tag{2.45}$$

2.2.5.3 การไหลในหัวฉีด (Nozzle) ออริฟิซ (Orifice) และ เซดแท็งก์ (Head Tank) การไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle)

การไหลในหัวฉีด (Nozzle)

ภายในภาชนะบรรจุแก๊สขนาดใหญ่มีแก๊สบรรจุอยู่ภายใน (มีอุณหภูมิ T_0 และมีความดัน P_0) แก๊สไหลผ่านหัวฉีดเล็กไปสู่ที่ว่างที่มีความดัน (ด้านกลับ) P_b เมื่อความดันด้านกลับ P_b ความเร็วของแก๊สที่พุ่งออกมาก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่สุดก็จะเข้าใกล้ความเร็วเสียง หลังจากนั้นไม่ว่าความดันด้านกลับจะลดลงเท่าไรก็ตาม ปริมาณการไหลก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ณ สถานะนี้การไหลของ

ก๊าซจะพัฒนาเข้าสู่สภาวะวิกฤติ (หรือเรียกว่าสภาวะช็อค) อัตราส่วนความดัน P_0/P_c ที่สภาวะหลังนี้เรียกว่า อัตราส่วนความดันวิกฤติ P_0/P_c ค่านี้จะถูกกำหนดโดยค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะเท่านั้น ในกรณีของอากาศนี้จะมีค่าประมาณ 2



ภาพที่ 2.13 การไหลผ่านหัวฉีด [2]

ถ้าความเร็วในการไหลของก๊าซต่ำๆ (โดยปกติจะอยู่ที่ต่ำกว่า 0.2-0.3 เท่าของความเร็วเสียง) จะสามารถพิจารณาให้เป็นการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ การไหลของของไหลในอุดมคติที่อัดตัวไม่ได้ (ไม่มีการสูญเสีย) แบบนี้สามารถใช้สมการของเบอร์นูลลี สมการที่ 2.24 ได้ ในกรณีนี้ถือว่าเป็นอัตราการไหลในทางอุดมคติ Q สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = A_c \sqrt{\frac{2(P_0 - P_c)}{\rho}} \quad (2.46)$$

ในสมการนี้ค่า A_c คือพื้นที่หน้าตัดที่ทางออกของหัวฉีด

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลจริง Q กับปริมาณการไหลในทางอุดมคติ Q^* สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Q = CQ^* \quad (2.47)$$

ในสมการนี้ ค่า C จะเรียกว่า “ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล” ($C < 1$)

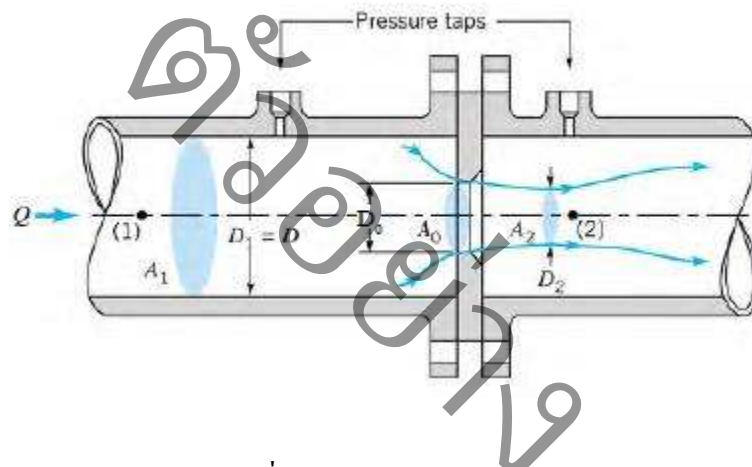
การไหลผ่านช่องแคบ หรือช่องออร์ฟิซ (Orifice)

ออร์ฟิซดังแสดงในภาพที่ 2.14 (โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่องการไหล ที่หน้าตัด A_1 เป็น D_1 และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรงทางเข้าออร์ฟิซเป็น D_0 และเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงที่ของไหลถูกอัดให้การไหลเหลือเล็กน้อยที่สุดเป็น D_2) และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลเป็น C จากสมการที่ 2.45 และ สมการที่ 2.46 จะเขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็น

$$Q = CA_o \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.47)$$

ในแต่ละเส้นทางการไหลสามารถใช้สมการเบอร์นูลลีมาคำนวณได้ จากสมการที่ 2.24 กับ สมการที่ 2.27 และจำหา Q ได้ว่า

$$\begin{aligned} Q &= A_2 \frac{\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = A_o \frac{\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} (A_2 - A_o)}{\sqrt{1 - (A_o - A_1)^2 \left(\frac{A_2}{A_o}\right)^2}} \\ &= \frac{C_2}{\sqrt{1 - m^2 C_2^2}} A_o \sqrt{2 \frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} \end{aligned} \quad (2.48)$$



ภาพที่ 2.14 การไหลผ่านออร์ฟิซ [2]

จากสมการข้างต้น $m = A_o/A_1 = (D_2/D_0)^2$ และสัมประสิทธิ์การหดตัว (Coefficient of Contraction)

$$C_2 = A_2/A_o = (D_2/D_0)^2$$

จากสมการข้างต้นเมื่อเทียบกับสมการที่ 2.47 ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของออร์ฟิซ C จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C = \frac{C_2}{\sqrt{1 - m^2 C_2^2}} \quad (2.49)$$

เมื่อค่าเรย์โนมีค่ามากไปจนถึงค่าๆ หนึ่ง ค่า C_2 จะเป็นค่าคงที่ ค่า C จะเป็นค่าที่ถูกกำหนดด้วยค่า m กล่าวคือ ค่า C จะไม่ขึ้นกับปริมาณการไหล แต่จะเป็นค่าคงที่

เมื่อวัดค่าความแตกต่างของความดันที่ด้านหน้าและด้านหลังแผ่นออริฟิซก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณการไหลได้ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับเครื่องมือวัดการไหลแล้วจะมีขีดจำกัดของการไหลที่ต่ำที่สุดอยู่ อันเนื่องมาจากค่า C เป็นค่าคงที่ นอกจากนั้นเมื่อความเร็วของการไหลของก๊าซโดยทั่วไปมากกว่า 0.2 เท่าของความเร็วเสียง จะทำให้ไม่สามารถละทิ้งเรื่องคุณสมบัติของการหดตัวเนื่องจากการอัดได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ค่า C เนื่องมาจากคุณสมบัตินี้ด้วย

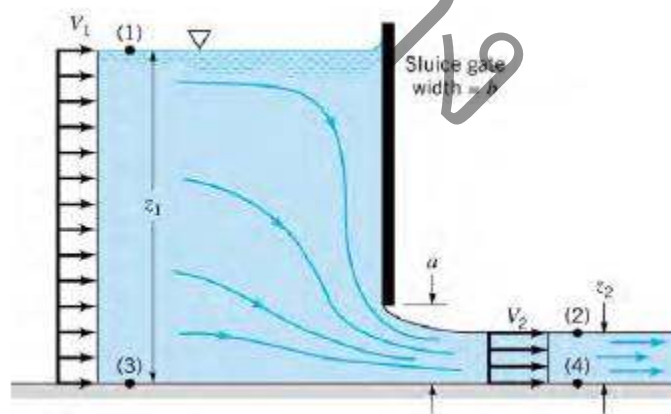
การไหลของเฮดแท็งก์ (Head Tank)

การไหลจากเฮดแท็งก์ ในกรณีที่ไม่มี การสูญเสียความดัน ปริมาณการไหลออกทางอุดมคติ Q^* ระหว่างระดับน้ำในแท็งก์ จากภาพที่ 2.15 ที่จุด 1 กับระดับที่ทางออกที่จุด 2 สามารถใช้สมการที่ 2.27 ของเบอร์นูลลีในการคำนวณหาได้โดย

$$Q = A_E \sqrt{2gH} \quad (2.50)$$

เมื่อ A_E คือ น้ำที่ทางออก ($a \times b$)
 H คือ $z_1 - z_2$

จากภาพที่ 2.15 ในการไหลในสภาพความเป็นจริงจะมีการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากความเสียดทานในการไหล ฯลฯ ปริมาณการไหลจริง Q จะน้อยกว่าปริมาณการไหลทางอุดมคติ Q^* อยู่



ภาพที่ 2.15 การไหลในเฮดแท็งก์ [2]

$$Q = CQ^* \quad (2.51)$$

โดยค่า C ในสมการนี้จะเหมือนกันกับค่าสัมประสิทธิ์การไหล C ในสมการที่ 2.46 ที่จุด 1, 2 เมื่อไม่คิดคำนึงถึงความดันที่สูญเสียไป จากสมการที่ 2.27 จะได้ว่า

$$P_2 = P_1 + \rho gH - \rho V_2^2 / 2 \quad (2.52)$$

จากสมการที่ 2.24 $V_2 = Q/A_2 = (Q/A_E)(A_E/A_2)$ จะได้ว่า

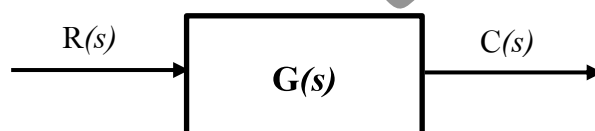
$$P_2 = P_1 - \left[\left(\frac{C}{C_C} \right)^2 - 1 \right] \rho gH \quad (2.53)$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ชัดว่า P_2 จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับ H

2.3 ทฤษฎีระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสอง [3]

โดยปกติทั่วไปแล้ว ระบบควบคุมที่สามารถพบเจอได้ในปัจจุบันจะมีชนิดหลายอันดับ แต่ระบบอันดับหนึ่งและระบบอันดับสองนั้นเป็นพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาวิชาด้านระบบควบคุม จึงจะขอก้าวในรายละเอียดดังนี้

ระบบอันดับหนึ่งจะเป็นระบบที่ปราศจาก Zero สามารถที่จะแสดงด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ได้ดังสมการที่ 1 ถ้าสัญญาณเป็นสัญญาณระดับ เมื่อ $R(s) = 1/s$ ฟังก์ชันการถ่ายโอนคือ



ภาพที่ 2.16 ระบบอันดับ 1 (First-order system) [4]

$$\text{เมื่อ } G(s) = \frac{a}{s + a} \quad (2.54)$$

$$R(s) = \frac{1}{s} \quad (2.55)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ $G(s)$ และ $R(s)$ เป็นอินพุตแบบสัญญาณระดับ (Unit step) จะสามารถหาสมการทางเอาต์พุต ดังสมการที่ 2.56

$$C(s) = G(s)R(s) = \frac{a}{s + a} \quad (2.56)$$

พิจารณาแยกเศษส่วนย่อยจะได้

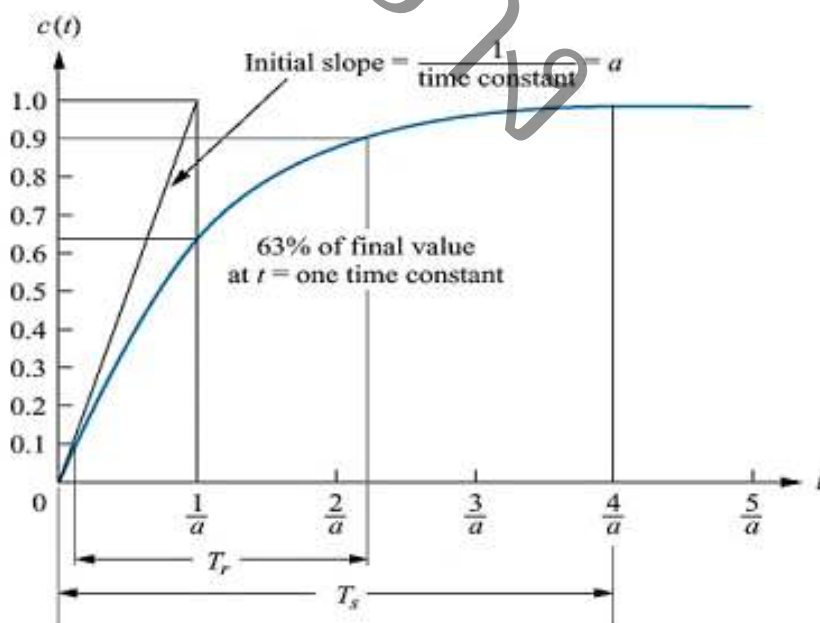
$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + a} \quad (2.57)$$

แปลงลาปลาซผกผันจะได้

$$C(t) = (1 - e^{-at}) \quad (2.58)$$

การตอบสนองของระบบแสดงได้ดังภาพที่ 2.17 การตอบสนองของระบบ สิ่งที่เราพิจารณาคือ Rise time และ Setting time

ข้อสังเกต ถ้าค่าคงที่ของเวลา (Time constant) $T = 1/a$ น้อยลงเท่าใด ระบบจะเข้าสู่สภาวะเสถียรโดยใช้เวลาที่น้อยลง ระบบอันดับหนึ่ง ค่อนข้างจะใช้น้อยมากแต่จะเสถียรมาก ที่จุด $t = T$ จะได้ค่าของ $C(t)$ เท่ากับ 0.632 หรือ 63.2% ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ลักษณะความชันของระบบจะมีค่าเท่ากับ $1/T$ ในที่นี้คือ a



ภาพที่ 2.17 การตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งต่ออินพุตแบบสัญญาณระดับ [4]

สัญญาณความคลาดเคลื่อน $e(t)$ หาได้จาก

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2.59)$$

$$e(t) = e^{-at} \quad (2.60)$$

เมื่อ t เข้าสู่อนันต์แล้วค่า e^{-at} จะเข้าสู่ศูนย์นั้นคือจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

2.3.2 ระบบอันดับสอง (Second-Order System)

ระบบอันดับสอง สามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.61)$$

โดยที่ ω_n คือความเร็วเชิงมุมในการแกว่งตามธรรมชาติ (Natural frequency) ζ คืออัตรา
การหน่วงของระบบ (Damping ratio) โพลของระบบอันดับสอง คือ

$$P_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d, \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.62)$$

จากสมการที่ 2.62 สามารถแบ่งการศึกษาเป็น 4 กรณีด้วยกัน คือ

- Overdamped responses

มีโพลเป็นจำนวนจริงสองค่าที่ $-\sigma_1 - \sigma_2$ การตอบสนองทางธรรมชาติเป็นสัญญาณ
เอ็กโพเนนเชียลสองตัว ที่มีค่าคงที่ของเวลาเท่ากับส่วนกลับของค่าโพลทั้งสอง

$$C(t) = K_1 e^{-\sigma_1 t} + K_2 e^{-\sigma_2 t} \quad (2.63)$$

- Underdamped response $0 < \zeta < 1$

จะมีโพลเป็นจำนวนเชิงซ้อนเป็นจำนวนเชิงซ้อนสองตัวที่ $-\sigma_a \pm j\omega_d$ การ
ตอบสนองทางธรรมชาติเป็นการแกว่งแบบลูกคลื่นซายน์ ซึ่งมีขนาดเป็นเอ็กโพเนนเชียลที่ค่าคงที่
ของเวลามีค่าเท่ากับส่วนจริงของโพลซึ่งมีค่าลดลงตามเวลา ความถี่ของซายน์ ความถี่ของการแกว่ง
มีค่าเท่ากับส่วนของจินตภาพของโพล

$$C(t) = Ae^{-\sigma_d t} \cos(\omega_d t - \phi) \quad (2.64)$$

- Critically damped response $\zeta = 1$

จะมีโพลเป็นจำนวนจริงซึ่งมีค่าซ้อนกัน 2 ค่า ที่ $-\sigma_1$ การตอบสนองทางธรรมชาติมีหนึ่งเทอมที่เป็นเอ็กโปเนนเชียลซึ่งมีค่าคงที่ของเวลาเท่ากับส่วนกลับของค่าโพล อีกเทอมก็จะเป็นผลคูณของเวลา (t) กับเอ็กโปเนนเชียลซึ่งมีค่าคงที่ของเวลาเท่ากับส่วนกลับของค่าโพล

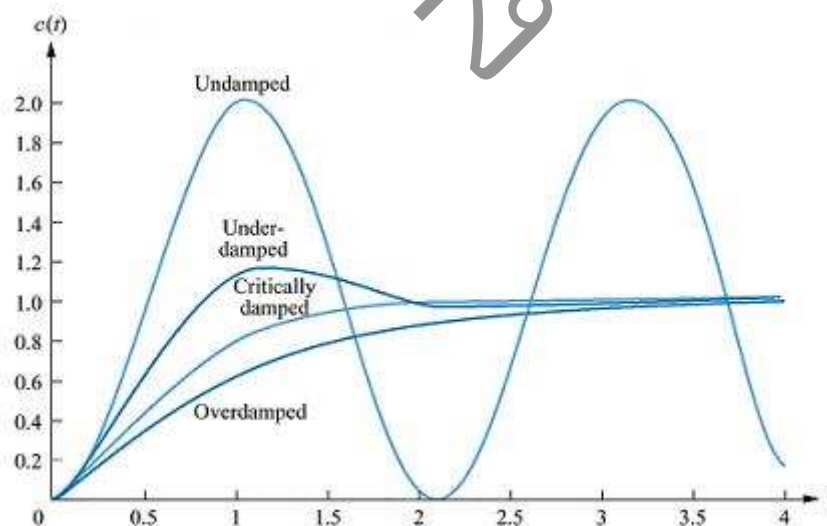
$$C(t) = K_1 e^{-\sigma_1 t} + K_2 t e^{-\sigma_1 t} \quad (2.65)$$

- Undamped responses $\zeta = 0$

จะมีโพลมีค่าเป็นจำนวนจินตภาพสองจำนวนอยู่ที่ $\pm j\omega_1$ การตอบสนองทางธรรมชาติเป็นคลื่นไซน์ซึ่งมีความถี่เท่ากับส่วนจินตภาพของโพลและมีขนาดคงที่

$$C(t) = A \cos(\omega_1 t - \phi) \quad (2.66)$$

การตอบสนองของระบบและค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของระบบแสดงไว้ในภาพที่ 2.18 การตอบสนองในกรณี Underdamped กรณี ζ ถือว่าเป็นการตอบสนองที่ดีที่สุดของระบบอันดับสอง เนื่องจากให้ Rise time และ Settling time ที่ดีที่สุด



ภาพที่ 2.18 การตอบสนองของระบบอันดับสอง เมื่ออินพุตเป็น Unit step พั้ง 4 กรณี [4]

คุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วขณะของระบบอันดับสอง เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตมาตรฐานที่เป็นสัญญาณแบบอันดับหนึ่งสามารถตรวจสอบคุณสมบัติบางประการของระบบควบคุม โดยการวิเคราะห์จากค่าต่าง ๆ ดังนี้

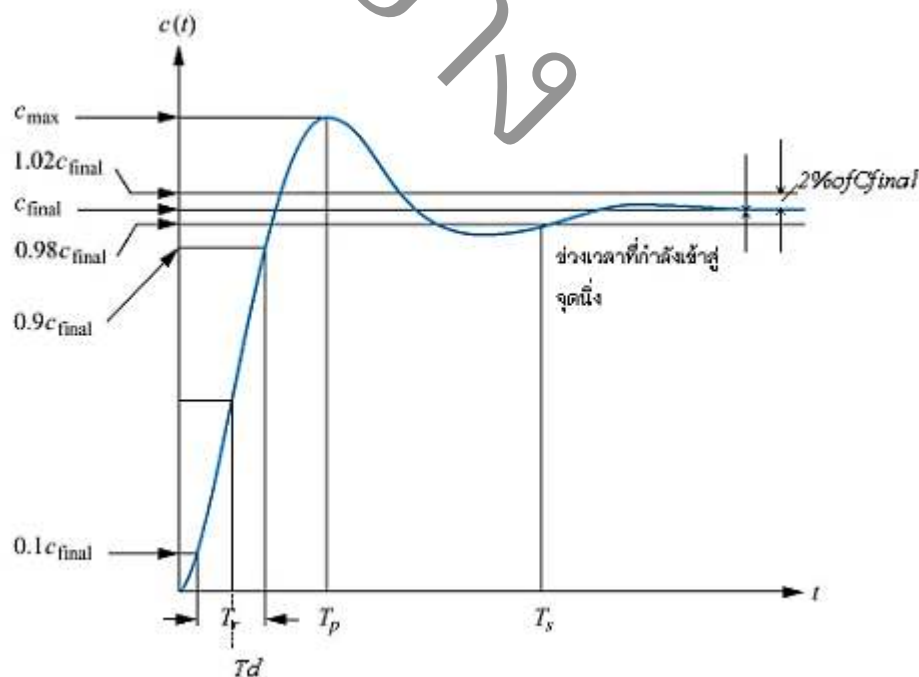
- เวลาหน่วง (Delay time, t_d) ปกติกำหนดจากเวลาที่ผลตอบสนองมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งหรือ 50% ของค่าสุดท้าย

- ช่วงเวลาขึ้น (Rise time, t_r) เป็นเวลาที่วัดจากผลตอบสนองมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 90% หรือ 5% ถึง 95% หรือ 0% ถึง 100% สำหรับระบบในสภาวะความหน่วงมาก (Overdamped) ปกติจะใช้ 10% ถึง 90%

- เวลาของค่ายอด (Peak time, t_p) คือเวลาที่ระบบควบคุมมีการตอบสนองสูงสุด หาได้จากสมการ

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.67)$$

- โอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot, M_p) เป็นตัวบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างสัญญาณอินพุตและ สัญญาณเอาต์พุตที่สถานะของทรานเซียนท์และยังเป็นตัวช่วยวัดถึงเสถียรภาพของระบบด้วย ซึ่งจะวัดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่เทียบจากค่าสุดท้าย



ภาพที่ 2.19 ลักษณะการตอบสนองชั่วขณะของระบบอันดับสอง [4]

- เวลาสู่จุดสมดุล (Settling time, t_s) เป็นเวลาที่ผลตอบสนองมีขนาดลดลงอยู่ภายในค่าที่กำหนดไว้โดยปกติจะกำหนดเป็นค่าที่ลดลงจากค่าสุดท้าย 2% หรือ 5%

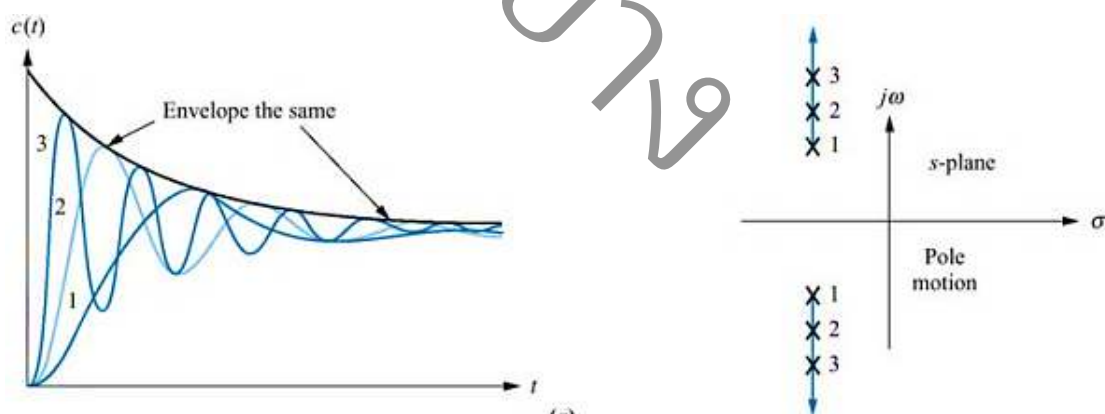
$$T_s = \frac{-\ln(0.02\sqrt{1-\zeta^2})}{\zeta\omega_n} \quad (2.68)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลและการตอบสนองของระบบอันดับสอง ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.20 ถึงภาพที่ 2.22

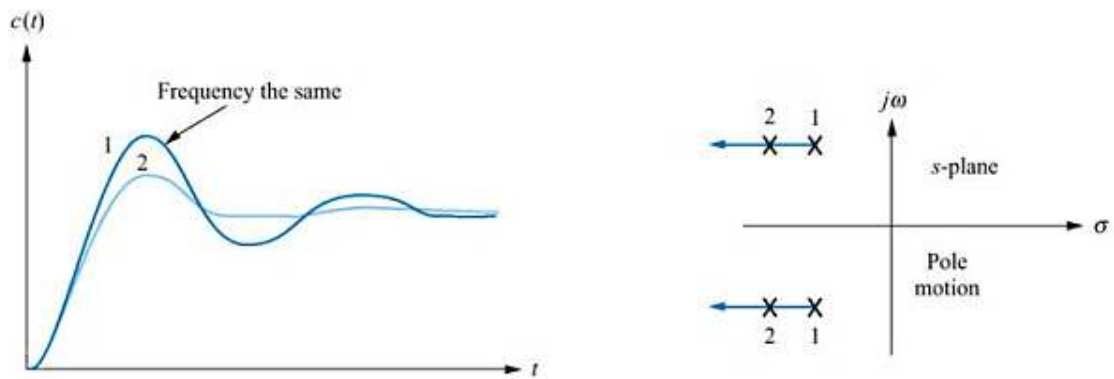
- เมื่อโพลมีค่าส่วนจริงคงที่ (Constant real part) ภาพที่ 2.20 ผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุต Step function จะมีอัตราการลดลงของการตอบสนองที่เหมือนกัน แต่การตอบสนองจะมีความถี่ของสัญญาณชาชนที่แตกต่างกัน

- เมื่อโพลมีค่าส่วนจินตภาพคงที่ (Constant imaginary part) ภาพที่ 2.21 ผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุต Step function จะมีการตอบสนองที่มี Overshoot คงที่ แต่จะมีความถี่ของสัญญาณชาชนและอัตราการลดลงของการตอบสนองที่ต่างกัน

- เมื่อโพลมีอัตราการแกว่งที่คงที่ (Constant damping ratio) ภาพที่ 2.22 ผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุต Step function จะมีการตอบสนองที่มี Overshoot คงที่ แต่จะมีความถี่ของสัญญาณชาชนและอัตราการลดลงของการตอบสนองที่ต่างกัน



ภาพที่ 2.20 โพลมีส่วนจริงคงที่ [4]



ภาพที่ 2.21 โพลมีส่วนจินตภาพคงที่ [4]



ภาพที่ 2.22 อัตราส่วนการแกว่งมีขนาดคงที่ [4]

2.4 ทฤษฎีการควบคุมแบบ PID [5]

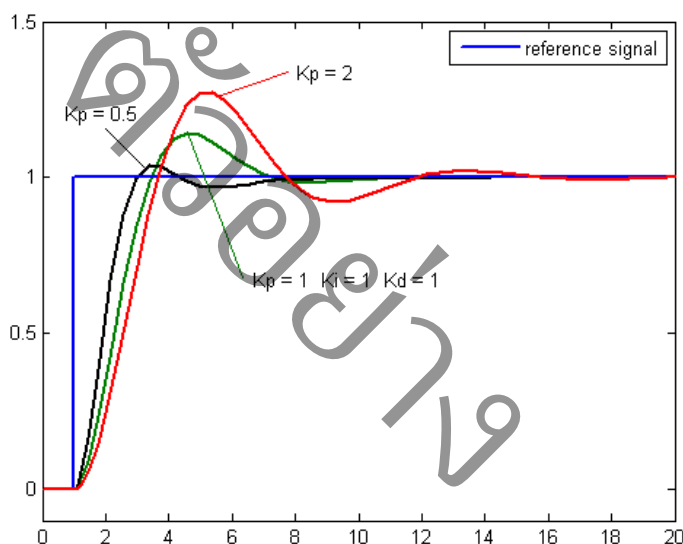
ระบบควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ปริพันธ์และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoot) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้

ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ PID บางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง ทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการที่ 2.69

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.69)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอม ซึ่งนิยามตามรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน Proportional control action (P-Action)



ภาพที่ 2.23 กราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่) [5]

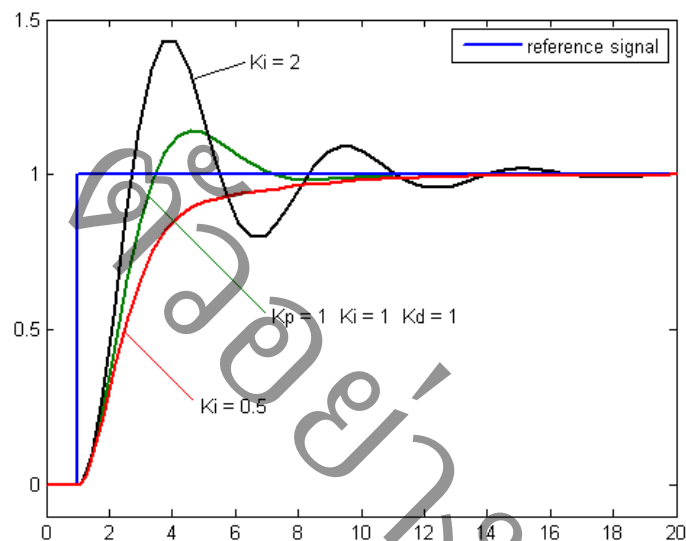
เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วนเทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ 2.70

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.70)$$

เมื่อ	P_{out}	คือ	สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
	K_p	คือ	อัตราขยายสัดส่วน ตัวแปรปรับค่าได้
	$e(t)$	คือ	ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

2.4.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ Integral control action (I-Action)



ภาพที่ 2.24 กราฟ PV ต่อเวลา K_i กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_d คงที่) [5]

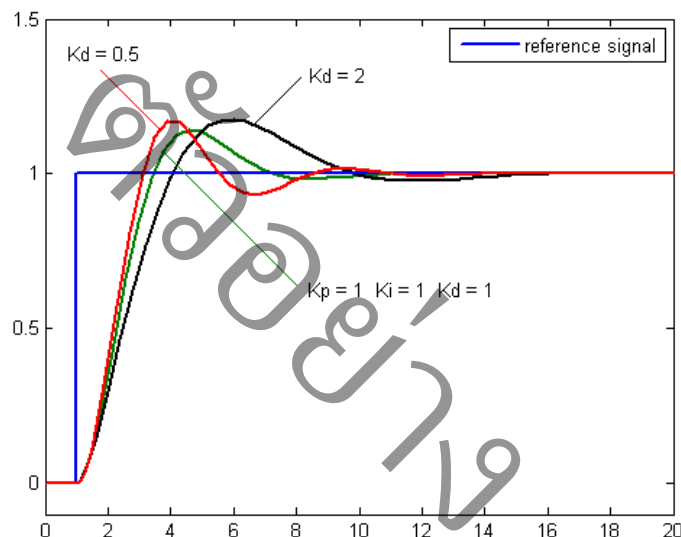
เทอมของปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ K_i เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ 2.71

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.71)$$

เมื่อ	I_{out}	คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
	K_i	คือ อัตราขยายปริพันธ์ ตัวแปรปรับค่าได้
	$e(t)$	คือ ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

2.4.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ Derivative control action (D-Action)



ภาพที่ 2.25 กราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่) [5]

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียกว่า อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์ K_d เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ 2.72

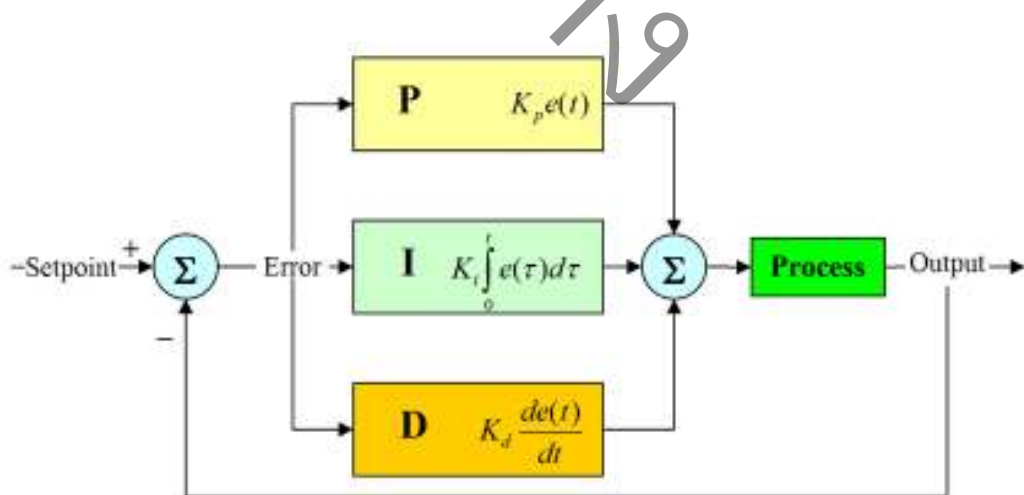
$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.72)$$

เมื่อ	P_{out}	คือ	สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
	K_p	คือ	อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
	$e(t)$	คือ	ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอซึ่งลักษณะการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในเทอมของเวลาได้ ดังสมการ 2.73

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.73)$$

และจากสมการที่ 2.73 สามารถแสดงในรูปของไดอะแกรมของการประยุกต์ใช้หลักการควบคุมแบบ PID ในการปรับค่าเกนของตัวควบคุมดังภาพที่ 2.26 นอกจากนี้ยังสามารถนำไปทำงานร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้และชดเชยค่าความไม่แน่นอนและวิธี Conventional boundary layer technique (BL technique) ได้

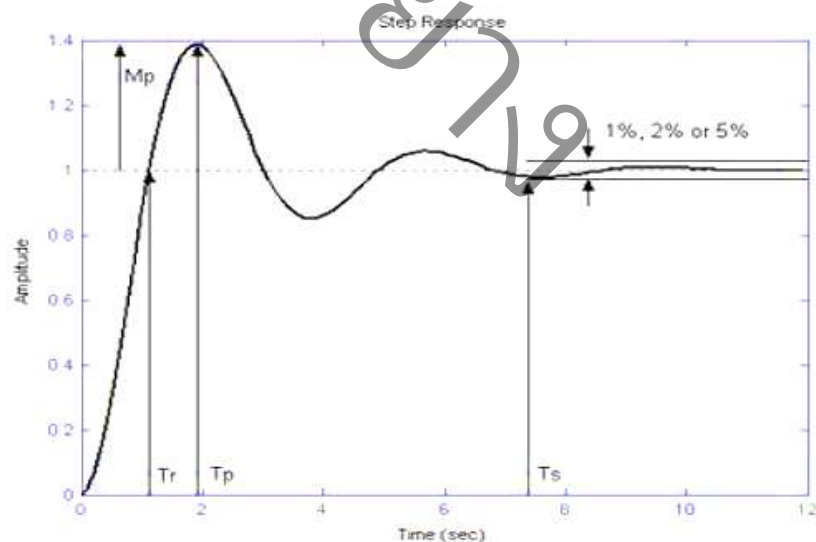


ภาพที่ 2.26 ส่วนประกอบของระบบควบคุมอัตโนมัติ [5]

จากภาพที่ 2.26 ระบบควบคุมจะเริ่มพิจารณาจากเอาต์พุตของกระบวนการซึ่งอาจจะเป็น อุณหภูมิ หรือ ความดัน เป็นต้น เอาต์พุตจะถูกวัดและแปลงสัญญาณ โดยอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อ แปลงปริมาณทางกายภาพที่วัดได้ไปเป็นปริมาณที่ต้องการ เช่น ปริมาณทางไฟฟ้า จากนั้นค่าที่วัด ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า อินพุตที่ตั้งไว้ ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปให้ตัวควบคุมเพื่อ สร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมกระบวนการต่อไป ขั้นตอนทั้งหมดนี้จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง ค่าอินพุตกับค่าที่วัดได้มีขนาดเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญว่าเป็นหัวใจสำคัญของระบบควบคุมอัตโนมัติ คือ ตัวควบคุม (Controller) ซึ่งก็มีมากมาย หลายชนิดให้เลือกใช้งาน แต่ตัวควบคุมที่ยังคงได้รับความนิยมอย่างสูงนับจากอดีตจนถึงปัจจุบันก็คือตัวควบคุม แบบ พี ไอ ดี (PID Controller) สาเหตุที่ทำให้ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ก็เนื่องจากความเรียบง่ายของ โครงสร้างตัวควบคุมและความสามารถในการลดค่าความผิดพลาดได้หลายชนิดในตัวควบคุมเดียว

2.4.4 ผลการตอบสนองของระบบ

กระบวนการ หรือ ระบบเมื่อได้รับอินพุตก็จะต้องมีการตอบสนองออกมาเป็นเอาต์พุต ซึ่งรูปแบบการตอบสนองนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของอินพุตที่ใส่เข้าไป ในการนิยามตัวแปรต่าง ๆ ในการตอบสนองของระบบ เรามักจะนิยามอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้น แล้วดูผลการตอบสนองของ ระบบพลศาสตร์โดยทั่วไปเมื่อได้รับอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นก็จะมีการตอบสนองเป็นดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองของระบบ [5]

จากภาพที่ 2.27 พารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้

1. ช่วงเวลาขึ้น (Rise time, T_r) หมายถึง ช่วงเวลาที่ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มจาก 10% จนถึง 90% หรือจาก 5% ถึง 95% หรือจาก 0% ถึง 100% ดังนั้นการกำหนดช่วงเวลาขึ้นจำเป็นต้องบอกด้วยว่าวัดโดยใช้ช่วงเวลาไหน
2. เวลาของค่ายอด (Peak time, T_p) หมายถึง เวลาที่สัญญาณผลการตอบสนองมีค่าสูงสุดค่าแรกของผลการตอบสนองนั้น ๆ
3. โอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum overshoot, M_p) หมายถึง ค่าการตอบสนองสูงสุดที่วัดจากสถานะอยู่ตัวสุดท้าย (Final steady state) การบอกค่าโอเวอร์ชูตสูงสุดมักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์
4. เวลาเข้าที่ (Setting time, T_s) หมายถึง เวลาที่ผลการตอบสนองลดลงจนเริ่มเข้าไปอยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งจะวัดเทียบกับค่าสุดท้ายของผลการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวสุดท้าย (Final steady state) ค่าที่นิยมกำหนดสำหรับช่วงนี้มักจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น 1%, 2% หรือ 5% เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบ PID ต่อการตอบสนองของระบบ [5]

ค่าเกน	ช่วงเวลาขึ้น (T_r)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (M_p)	เวลาเข้าที่ (T_s)	ค่าความผิดพลาด ณ สถานะอยู่ตัว
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนแปลงน้อย มาก	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงจนหมด
K_d	เปลี่ยนแปลงน้อย มาก	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลงน้อย มาก

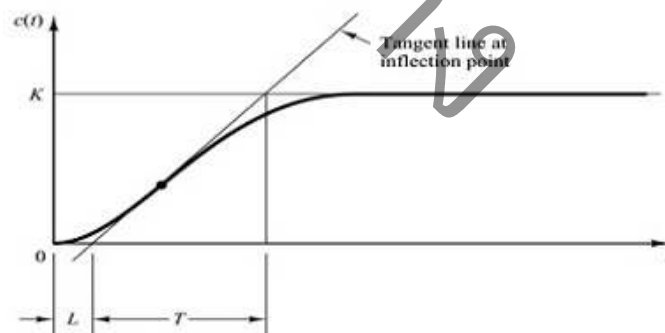
จากตารางที่ 2.2 จะแสดงถึงผลกระทบของค่าเกนในตัวควบคุมแบบ PID ต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองของระบบ ซึ่งจะพบว่าค่าเกน K_p จะทำให้ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ลดลง และลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัว แต่ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดได้ค่าเกน K_i จะมีหน้าที่หลักในการลดค่าความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวให้หมดไป แต่การเพิ่มค่าเกน K_i มากเกินไปก็จะทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวของระบบเสียไปได้ ส่วนค่าเกน K_d มีหน้าที่หลักในการลดโอเวอร์ชูตสูงสุดลง และทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวของระบบดีขึ้น

2.4.5 การหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ PID

การหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการตามที่ต้องการนั้นเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากถ้าค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบ PID ไม่เหมาะสม อาจมีผลทำให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ตามที่ต้องการหรืออาจมีผลทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบ PID ที่เป็นที่ยอมรับในการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจนถึงปัจจุบันคือวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols compensation) ซึ่งวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ มีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผลตอบสนองทางเวลาของระบบต่ออินพุตแบบสัญญาณระดับ (Unit step) มีค่าของ Maximum overshoot ไม่เกิน 25% ในการหาค่า K_p, T_i, T_d จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่ถูกควบคุมซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process Reaction Curve) และวิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate cycle method)

วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process Reaction Curve)

ระบบหรือกระบวนการที่นำมาใช้ในกรณีนี้จะไม่มีโพลที่จุด Origin หรือไม่มี Dominant complex-conjugate poles และไม่มีตัวควบคุมต่อรวมอยู่ ดังนั้นผลตอบสนองทางเวลาจะเป็นรูปตัว S ดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 การตอบสนองของระบบโดยวิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ [5]

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

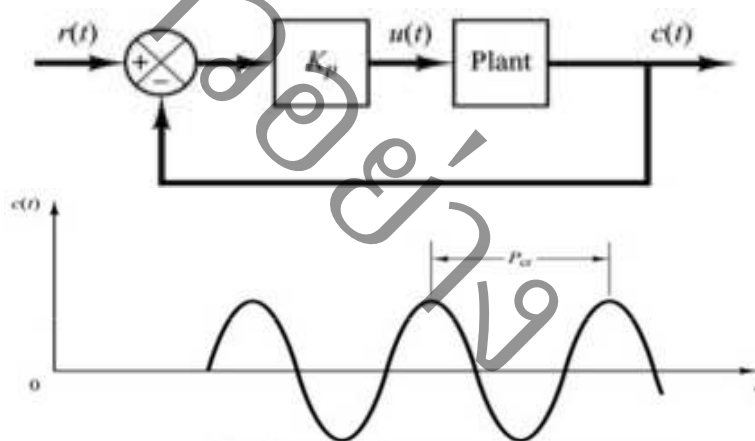
$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (2.74)$$

ตารางที่ 2.3 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีการปฏิบัติการของกระบวนการ [5]

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

วิธีการวัฏจักรสุดท้าย (Ultimate Cycle Method)

วิธีนี้จะหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองทางเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วน เมื่ออินพุตแบบสัญญาณระดับ (Unit step) ต่อมาทำการปรับค่าของ K_p ไปเรื่อย ๆ จนผลตอบสนองทางเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Sustained oscillations) ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 ผลตอบสนองทางเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง [5]

ตารางที่ 2.4 ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ โดยวิธีการวงจรถูกสุดท้าย [5]

ชนิดตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ เขาวฤทธิ พลวัฒน์[6] ได้ทำการศึกษาการควบคุมระบบแบบเปิด-ปิด และ แบบ PID ในชุดฝึกระบบควบคุม จากการศึกษาพบว่า จากชุดฝึกระบบควบคุมกระบวนการ ที่สร้างขึ้นดังกล่าวนี้สามารถทำให้ผู้เรียนเรื่องระบบควบคุมอัตโนมัติจากทฤษฎีเกิดความสัมฤทธิ์ผลดียิ่งขึ้น เข้าใจมากขึ้นจากการทดลองลงมือปฏิบัติจริงทั้งการควบคุมแบบ เปิด-ปิด ซึ่งในทางทฤษฎี ไม่มีการกล่าวถึงการใช้ช่วงควบคุม (Smoothing band) เพื่อลดการ Switch ของ Control Action และในการควบคุมแบบ PID ทฤษฎีของ เป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการปรับค่าคงที่ PID ซึ่งไม่สามารถทำได้ในทางทฤษฎี ซึ่งต้องปรับค่าจากระบบจริงเท่านั้น และยังมีข้อจำกัดอื่นเช่น การอิ่มตัว (Saturation) ของ Actuators

2.5.2 สุรเชษฐ์ สว่างเนตร[7] ได้ทำการศึกษาเรื่องการควบคุมความดัน ในระบบเซอร์โวไฮดรอลิกส์ด้วยตัวควบคุมแบบ พิชชี่ พีไอดีแบบปรับค่าได้ การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการออกแบบ และ สร้างระบบควบคุมแบบพิชชี่ พีไอดีแบบปรับค่าได้ ในการควบคุมระบบเซอร์โวไฮดรอลิกส์ โดยใช้ระบบควบคุมแบบพิชชี่ลอจิกเป็นตัวปรับค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมแบบ พีไอดี เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการควบคุมมากขึ้น และได้นำมาเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพิชชี่แบบพื้นฐาน การควบคุมแบบพีไอดีเพื่อค้ำยันการตอบสนองที่ออกมา ว่าการควบคุมแบบที่ทางผู้วิจัยเลือกกับการควบคุมแบบดั้งเดิม ว่าแบบไหนที่มีความสามารถในการควบคุมที่ดีกว่ากัน หรือมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งานมากกว่ากัน จากการทดลองปรากฏว่าการควบคุมแบบพิชชี่ พีไอดีแบบปรับค่าได้นี้สามารถควบคุมระบบได้ และมีผลการตอบสนองที่ไว และมีประสิทธิภาพสูงกว่า

2.5.3 ยุทธนา กัณฑ์พะเยา และเฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์[8] ได้ศึกษาการควบคุมของเหลว โดยใช้โปรแกรม LabVIEW พบว่าจากเงื่อนไขขอบเขตที่ได้กำหนดไว้โดยการสร้างชุดทดลอง ต้นแบบสำหรับการควบคุมของเหลวโดยใช้โปรแกรม LabVIEW จำนวน 1 ชุด นั้นพบว่า ระบบควบคุมของเหลวทั้งแบบ 1 ถึง และ 2 ถึง นั้นสามารถดำเนินการได้ตามเงื่อนไขการกำหนดค่าเป้าหมาย มีค่าความผิดพลาดตาม คุณลักษณะเฉพาะของตัวควบคุมแต่ละแบบ ดังนั้นผลงานวิจัยที่ได้จัดทำขึ้นยังถูกนำไปใช้กับการเรียน การสอนวิชาปฏิบัติการระบบควบคุม โดยใช้เป็นชุดสาธิตการ ออกแบบระบบควบคุมวงรอบปิด ผลที่ได้ นักศึกษาสามารถเข้าใจเนื้อหาสาระในการเรียนรู้ได้ลึกซึ้ง

2.5.4 พันธุ์จันต์ สิงห์เฉลิม[9] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องทดสอบความดัน ภายในของถังก๊าซหุงต้มปิโตรเลียมเหลว การศึกษาครั้งนี้ อาศัยปั๊มแรงดันสูงเป็นตัวสร้างกำลังงาน และมีน้ำเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายกำลังงาน ปั๊มแรงดันสูงจะส่งน้ำเข้าในถังก๊าซเพื่ออัดน้ำให้ได้ความดันตามที่ต้องการคือ 3.3 MPa แล้วสังเกตปริมาตรการขยายตัวของถังก๊าซที่หลอดแก้ว วัดปริมาตรการขยายตัวและใช้วิธี รีลีฟาล์ว เป็นตัวควบคุมความดัน ในการทำการทดสอบครั้งนี้ใช้ความดันที่ 30 bar เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและจากการคำนวณพบว่าถังก๊าซขนาด 58 ลิตร ที่ความดัน 30 bar ที่ยอมรับได้ คือ 0.0116 ลิตร ในขณะที่ปริมาตรการขยายตัวของถังก๊าซจากการทดสอบคือ 0.0115 ลิตร จึงทำให้ผ่านการทดสอบที่ความดัน 3.3 MPa คือ เกิน 1 ใน 5000 และทำการตรวจสอบผิวภายนอกหลังการทดสอบพบว่าถังก๊าซไม่เกิดการบิดเบี้ยวใด ๆ เกิดขึ้น

2.5.5 ชวนากร จรธรรมย์ และ ชีระพันธ์ ศรีแจ่ม[10] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่อง การศึกษาตัวควบคุมแบบรวมชนิด PID สำหรับการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมเชิงตรรกะ รุ่น SIEMENS S7-300 ได้พบว่าปัจจัยที่ทำการควบคุมมี 3 ปัจจัยคือ ระดับน้ำในถังเก็บน้ำ ความดันในถังความดัน และอุณหภูมิของน้ำ โดยใช้วิธีการซีเกอร์-นิโคลส์ในการหาค่าคงที่ซึ่งระบบควบคุมระดับน้ำมีค่า K_p T_r T_d เท่ากับ 4 2500 และ 0 ตามลำดับ ระบบควบคุมความดันมีค่าคงที่เท่ากับ 28 5 และ 0 และระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 0.5 และ 0 โดยทั้ง 3 ระบบ จะมีอุปกรณ์ตรวจวัดค่าของแต่ละระบบ โดยสัญญาณควบคุมและสัญญาณผลตอบแทนเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 4-20 มิลลิแอมแปร์ หรือ ± 10 โวลต์ ขึ้นอยู่ ซึ่งทำให้ผลการทดลองการควบคุมปัจจัยทั้ง 3 ผ่าน PLC เป็นไปได้อย่างรวดเร็วโดยการควบคุมแบบ PID ทำให้ทั้งสามกระบวนการสามารถทำงานในสภาวะปกติ (normal-state) และแสดงผลแบบ real-time ได้

2.5.6 รองศาสตราจารย์อาจินต์ น่วมสำราญ[11] ทำการวิจัยเรื่องการออกแบบชุดทดลอง กระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง จากงานวิจัยพบว่า ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง เป็น อุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการตัวอย่างในการออกแบบระบบ ควบคุม สำหรับกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตที่สามารถพบเห็นได้ในหลายๆ อุตสาหกรรมซึ่ง โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตมักพบปัญหาในการ ควบคุมระบบเนื่องจากการรบกวนกันระหว่างค่าตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตทั้งสอง การออกแบบ ระบบควบคุมแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตที่มีการรบกวนกันเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบ ควบคุมตามต้องการ จึงต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจด้านคุณลักษณะของกระบวนการ ทฤษฎีการ ออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคต่างๆ รวมถึงทักษะความรู้ทางด้านการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัด ตัวแปลงสัญญาณและตัวควบคุม

2.5.7 มนตรี พิรุณเกษตร[12] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองระบบหาระยะเวลาการเติมอากาศ เข้าถึงลมจนถึงความดันที่ต้องการด้วยระบบการอัดอากาศแบบสองช่วง ซึ่งพบว่าหาระยะเวลา ในการเพิ่มความดันของอากาศในถังเก็บด้วยระบบการอัดอากาศสองช่วง จะพิจารณาการจำลอง ระบบในสถานะคงตัวเป็นกระบวนการอัดอากาศสองช่วงและการจำลองระบบภายใต้สถานะไม่คง ตัวเป็นกระบวนการเติมอากาศเข้าถึง อาศัยเทคนิคของ Successive Substitution หากคำตอบของ แบบจำลอง ค่าของอัตราการไหลโดยมวลที่ได้จากการจำลองกระบวนการอัดภายใต้สถานะคงตัวจะ ใช้เป็นอัตราการเติมมวลอากาศเข้าถึงภายใต้สถานะไม่คงตัว เพื่อให้ได้ระยะเวลาในการเพิ่มความดัน ของอากาศในถังเก็บจนถึงความดันค่าหนึ่ง ๆ แต่ละค่าความดันของอากาศในถังเก็บนั้นจะได้ค่าลู่ เข้าของอัตราการไหลโดยมวลของอากาศผ่านเครื่องอัด เมื่อเติมอากาศเข้าถึงจนกระทั่งถึงความดัน สุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งสามารถหาระยะเวลาในการเติมอากาศเข้าถึงเก็บจนถึงความดันสุดท้ายดังกล่าว นั้นได้ในที่สุด

2.5.8 สันติ หวังนิพนานโต และคณะ[13] ได้ทำการวิจัยการควบคุมความดันในถังนอน พบว่า งานวิจัยทำการศึกษาการควบคุมความดันในถังนอนให้คงที่ตามความต้องการของผู้ใช้ ถึงเก็บความ ดันที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 ซม. ยาว 60 ซม. และติดตั้งวาล์วควบคุมความดันด้านเข้าและ ด้านออก ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปิดและสั่งการแบบเปิด-ปิด เพื่อศึกษาอิทธิพลของ สมรรถนะการควบคุมและการรบกวนของระบบที่เงื่อนไขต่างกัน จากการทดสอบพบว่า เมื่อมีการ ตั้งค่าความดันเป้าหมายเพิ่มขึ้นหรือลดลง ระบบควบคุมพีแอลซีที่ออกแบบสามารถปรับปรุงระบบ ในถังให้มีความดันได้ตามต้องการโดยมีค่าความผิดพลาดที่สถานะคงที่ไม่เกิน 5% และใช้ ระยะเวลาขาขึ้น (Rise time) ไม่เกิน 2.5 วินาทีต่อความดันขึ้น 1.5 บาร์ นอกจากนี้ งานวิจัยได้ทำการ

ทดสอบระบบแบบเปิดจนกระทั่งได้ค่าทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของระบบถึงความดันเอาไว้ด้วย เพื่อทำการวิจัยในขั้นถัดไป

2.5.9 กอบเดช วงศ์คินี , บัญชา ป้อมสุวรรณ และ วันจักรี เล่นวาริ[14] ได้ทำการศึกษาเรื่องการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่น ซึ่งได้เสนอการออกแบบและหลักการพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีการรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำออกให้คงที่ในสภาวะที่เกิดการรบกวน(Disturbance) ในระบบ ได้แก่ สภาวะแรงดันน้ำเข้าที่ไม่คงที่ โดยตัวควบคุมชนิด Proportional+Integral+Derivative (PID)+ Feedforward ซึ่งถูกโปรแกรมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิน้ำให้คงที่ หลักการออกแบบตัวควบคุมถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เสนอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่เกิดการรบกวน สามารถนำระบบที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้ในพัฒนาเครื่องทำน้ำอุ่นให้มีประสิทธิภาพในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอนาคตได้

2.5.10 ชนัญญ์ชัย วุฒิชัยชาวัฒน์ และ คมะ [15] ทำการวิจัยเรื่องชุดทดลองการควบคุมกระบวนการอุณหภูมิแบบ 2 อินพุต - 1 เอาต์พุต จากการศึกษาแนวทางการออกแบบและสร้างชุดทดลองการควบคุมกระบวนการอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลอง และศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบควบคุมอุณหภูมิ นั้นพบว่า ชุดทดลองที่สร้างขึ้นนั้นมีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง โดยอัตราขยายของระบบควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในแต่ละจุดการทำงาน ค่าคงตัวเวลาและค่าเวลาไร้ผลตอบสนองของแต่ละจุดทำงานนั้น ค่อนข้างมีค่าที่คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ทำให้ชุดทดลองนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบการควบคุมเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี และเมื่อนำตัวควบคุมมาใช้ในการควบคุมกระบวนการนั้นพบว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมการทำงานของชุดทดลองได้เป็นอย่างดี สามารถควบคุมระบบควบคุมเมื่อสัญญาณอินพุตอุณหภูมิอ้างอิงเปลี่ยนแปลงได้ สามารถควบคุมการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้ และสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบควบคุมเมื่ออัตราการไหลของลมมีการเปลี่ยนแปลงไป

2.5.11 Jann, N.Y., Huang, H., and Lin, S.[16] ได้นำเสนอการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแบบไม่ทราบอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้วิธี Nonlinear Least Square และ Adaptive Nonlinear พบว่าเทคนิคการจำแนก ทั้ง 2 วิธี สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง และวิเคราะห์เพิ่มเติม มีความถูกต้องแม่นยำ และมีรูปแบบที่ง่ายในการใช้งานของผู้ปฏิบัติงาน

2.5.12 Lo, C.H., Chow, K.M., Wong, Y.K., and Rad, A.B.[17] ได้ศึกษาวิเคราะห์การระบบเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบแบบพลวัต รวมทั้งวิธีการค้นหาคำตอบด้วยจินเนติกอัลกอริทึมและหลักการค้นหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ไม่เป็นเชิงเส้น (First Order Nonlinear) พบว่าให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามความต้องการ และอย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.13 Sandra I., Perez-Aguilar., Everardo E., Granda-Gutierrez, Juan C., Diaz-Guillen, Jorge Candela Ramirez,[18] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสัญญาณไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้า โดยการจำลองการใช้ตัวควบคุม PID โดยตัวควบคุมจะทำการตรวจสอบกับข้อมูลจริง ควบคุมให้เป็นไปตามกระบวนการที่ได้รับการตอบสนองให้สอดคล้องกันทั้งขนาดและเวลา ซึ่งการออกแบบของตัวควบคุม PID จะใช้ในการควบคุมความดันในห้องระบบจากการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ซึ่งตัวควบคุมสามารถรักษาความดันให้อยู่ในช่วง 2% ในรูปแบบที่มีการก่อวน ในการทำงานในอนาคตทางผู้วิจัยได้นำเสนอให้มีการศึกษาการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.5.14 R. Gonzalez, A. Pawlowski, C. Rodriguez, J. L. Guzman and J. Sanchez-Hermosilla,[19] ได้ศึกษาและออกแบบการใช้น้ำแรงดันควบคุมแรงดันอัตโนมัติสำหรับระบบเครื่องพ่นน้ำแบบโมบาย โดยได้ทำการพัฒนาการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งสามารถควบคุมและจำกัดช่วงของความดัน ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในช่วง 4 ถึง 14 บาร์ รวมทั้งความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของการรบกวนได้อย่างรวดเร็ว

2.5.15 Sunyun LUO, Yuanming GONG, Xinping SONG,[20] ได้ทำการศึกษา การควบคุมความดันของหัวฉีดสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยการควบคุมแบบ PID โดยตัวควบคุมแบบ PID นี้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้การควบคุมความดันสามารถเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ซึ่งการควบคุมความดันน้ำมันในการวิจัยนี้สามารถควบคุมค่าความดันอยู่ในช่วง 25 Mpa ถึง 200 Mpa และมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 1 Mpa

2.5.16 Deepa S., Bhandare, N. R. Kulkarni[21] ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมความดัน ด้วยการควบคุมแบบ PID โดยใช้พื้นฐานการควบคุมแบบ พิชซี ชนิดปรับจูนด้วยตนเอง การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบ PID โดยเทคนิคการปรับจูนด้วยตนเอง ปรากฏว่าสามารถควบคุมความดันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การปรับกลไกการติดตามของตัวควบคุมเพื่อให้ติดตามค่า Setpoint ได้อย่างเหมาะสม และง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถทำงานได้อย่าง

เรียลไทม์ แม้กระบวนการที่ซับซ้อน การควบคุมแบบปรับจูนตัวเองได้ จะใช้หลักการการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d โดยจากการทดสอบกับระบบสามารถตอบสนองต่อสัญญาณ และระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อการควบคุมความดัน และเป็นที่น่าสนใจเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID เพียงอย่างเดียว

ตัวอย่าง